



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **TAPAUSTUTKIMUS LUMEN KUORMITTAMIEN TERÄSRAKENTEIDEN LUOTETTAVUUDESTA**

Impiö Simo Fredrik

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Toukokuu 2019

# TIIVISTELMÄ

## OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka			
Tekijä Impiö Simo Fredrik		Työn ohjaaja yliopistolla Niemi, A. TkT, dosentti	
Työn nimi Tapaustutkimus lumen kuormittamien teräsrakenteiden luotettavuudesta			
Opintosuunta Rakennesuunnittelu ja rakentamisteknologia	Työn laji Diplomityö	Aika Toukokuu 2019	Sivumäärä 51+ 5 s.
<p>Tiivistelmä</p> <p>Lumikuorma on aiheuttanut viime vuosina laajarunkoisten rakennusten kattorakenteiden vaurioitumisia eri puolilla Suomea. Rakenteiden kuitenkin tulisi olla luotettavia ja kestää jokatalvinen lumikuorma ilman lisätoimenpiteitä, kuten lumen poistamista. Työn tavoitteena on analysoida lumikuorman vaikutusta rakenteiden luotettavuuteen. Tutkimuksessa tarkastellaan Eurokoodissa ohjeistettua luotettavuustasoa ja Suomen kansallisessa liitteessä valitun kuormitusyhdistelyn tuottamaa luotettavuustasoa. Lisäksi tutkitaan, ovatko nykyisin eurokoodin mukaisessa mitoituksessa käytettävät lumen kuormitustapaukset riittäviä, vai pitäisikö eurokoodiin lisätä kuormitustapauksia.</p> <p>Suomessa mitoitukseen käytettävä kuormitusyhdistelmä on Eurokoodin lausekkeista (6.10a) ja (6.10b) epäedullisempi siten, että yhtälöön (6.10a) sisällytetään vain pysyvät kuormat. Tutkimuksessa havaittiin, että Suomen valitsemalla kuormitusyhdistelmällä ei välttämättä saavuteta Eurokoodin asettamaa tavoiteluotettavuutta sellaisissa tilanteissa, joissa lumikuorman osuus kokonaiskuormasta on hyvin suuri. Luotettavuustasoa on mahdollista parantaa siirtymällä Eurokoodin yhtälön (6.10) käyttöön.</p> <p>Eri kuormitustapausten analysointia varten mitoitettiin esimerkkiristikko, jonka diagonaalisauvojen sisäisiä voimasuureita vertailtiin eri kuormitustapauksissa. Havaittiin, että mitoittavaksi tapaukseksi voi osoittautua tilanne, jossa toisella lappeella on täysi lumikuorma ja toinen lape on tyhjä. Tällöin diagonaalisauvojen kuormitus voi muuttua siten, että osa sauvoista nurjahtaa. Tämän perusteella voidaan suositella kyseisen kuormitustapauksen lisäämistä nykyisten kuormitustapausten rinnalle. Nykyisiin kuormitustapauksiin sisältyy tilanne, jossa toisella lappeella on täysi lumikuorma ja toisella lappeella on puolikas lumikuorma. Tämä kuormitustapaus voitaisiin korvata tutkimuksessa lasketulla kuormitustapauksella.</p> <p>Tutkimuksessa käsitellään vain teräsrakenteita Suomessa. Rajatilamitoitus tehdään vain murtorajatilanteesta. Rakenteen väsymistä tai käyttäytymistä palotilanteesta ei huomioida.</p>			
Avainsanat Lumikuorma, eurokoodit, rakenteiden varmuus, teräsrakenteet.			

# ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Civil engineering			
Author Impiö Simo Fredrik		Thesis Supervisor Niemi, D.Sc. (Tech.), docent	
Title of Thesis A case study of reliability of snow loaded steel structures.			
Major Subject Structural engineering and construction technology	Type of Thesis Thesis	Submission Date May 2019	Number of Pages 51+ 5 p.
<p><b>Abstract</b></p> <p>Snow loads have caused damage to roof structures of wide-bodied buildings all over Finland during the last years. Structures should be reliable and stand on their own without additional measures like removing snow from the roof. The objective of this study is to increase knowledge about effects of snow load to the reliability of structures. The target reliability level set by the Eurocode standard and the reliability level induced by the load combination chosen in Finland are investigated. In addition to that, the currently employed snow load cases are sufficiently versatile, or whether more load cases should be added to the Eurocode.</p> <p>The load combination employed in Finland uses the more unfavourable of equations (6.10a) and (6.10b) from Eurocode so that equation (6.10a) includes only permanent loads. It was found out, that the target reliability level of Eurocode may not be reached by the load combination Finland has chosen in situations where the snow load is very dominant load component. The reliability level could be increased for instance by adopting the load combination of equation (6.10) in the Eurocode.</p> <p>For analyzing load cases, a model truss was designed and the internal forces were compared for different load cases. A situation where one roof slope has a full snow load and the another one is empty was found to be one of the most onerous situations. Then the stress in the diagonal profiles can change so that some of the profiles may buckle. Based on this, a particular load case is recommended to be added alongside the current ones. Nowadays there is a load case where one slope is fully loaded and the another side has a half snow load. This load case could be replaced by the load case that was found in this study.</p> <p>The study concerns only steel structures in Finland and only the ultimate limit state. Fatigue of steel or behaviour in fire is not observed.</p>			
<p><b>Keywords</b></p> <p>Snow load, eurocodes, structural reliability, steel structures</p>			

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on osa Oulun yliopiston Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelman tutkintovaatimuksia. Työ keskittyy eurokoodin mukaiseen rakennesuunnitteluun ja erityisesti lumikuorman alaisiin teräsrakenteisiin. Työn ohjaajana on toiminut Antti Niemi ja tarkastajana Matti Kangaspuoskari. Tutkimus on tehty Oulun yliopiston monitieteisessä arktista ympäristönmuutosta tutkivassa Arctic Interactions (ArcI)-hankkeessa ja sitä on rahoitettu Suomen Akatemian myöntämän profilaatorahoituksen (n:o 318930) turvin. Työtilat ja -välineet on saatu Rakenteet ja rakentamisteknologian tutkimusyksiköstä Rauno Heikkilän tuella. Tutkimuksen suorittaminen aloitettiin tutkimussuunnitelman laatimisella syksyllä 2018 ja työ valmistui keväällä 2019.

Jotta tutkimuksen lukeminen olisi mielekästä, lukijan tulisi tuntea kohtalaisesti eurokoodit, ymmärtää teräksen käyttäytyminen materiaalina sekä hallita rakennesuunnittelun perusteet.

Oulussa, 16.5.2019

Simo Impiö

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO .....	7
1.1 Tausta .....	7
1.2 Tavoite.....	7
1.3 Toteutus.....	8
2 RAKENTEIDEN MITOITUS STANDARDIN EN 1990 MUKAAN .....	10
2.1 Eurokoodien käyttämisen perusta .....	10
2.2 Rakenteiden suunnitteluperusteet.....	10
2.3 Rajatilamitoituksen periaatteet.....	13
2.4 Kuormat suunnittelussa.....	14
2.5 Kuormitusyhdistelmät murtorajatilassa .....	15
2.6 Lumikuorman laskeminen standardin EN 1990 mukaan .....	18
3 RAKENTEIDEN VARMUUS .....	23
3.1 Varmuusluvut suunnittelussa .....	23
3.2 Rakenteiden luotettavuus .....	24
3.3 Kuormien suhteen vaikutus luotettavuuteen .....	26
3.4 Mitoitus esimerkki .....	28
4 KUORMITUSTAPAUKSET.....	34
4.1 Staattiset kuormitustapaukset.....	36
4.1.1 Täysi lumikuorma molemmilla lappeilla.....	37
4.1.2 Täysi ja puolikas lumikuorma .....	38
4.1.3 Täysi lumikuorma vasemmalla lappeella .....	39
4.1.4 Tulosten tarkastelu.....	39
4.2 Dynaaminen kuormitus .....	44
5 YHTEENVETO .....	48

LÄHDELUETTELO

LIITE:

Liite 1. Ristikön mitoitus alueelle, jossa ominaislumikuorma maassa on 3,5 kN/m<sup>2</sup>

# MERKINNÄT JA LYHENTEET

## Latinalaiset isot kirjaimet

$A$	Teräsprofiilin poikkileikkauspinta-ala
$A$	Onnettomuuskuorma
$C_e$	Tuulensuojaisuuskerroin (0,8 tai 1,0)
$C_t$	Lämpökerroin (tavallisesti 1,0)
$D$	Dynaaminen kerroin
DSL	Lyhenne sanoista design supervisor level
$E$	Materiaalin kimmokerroin
$F_d$	Mitoituskuorma vuoden 1996 rakentamismääräyskokoelmassa
$G$	Pysyvät kuormat
$G_{k,j}$	Pysyvät kuormat
$I_y$	Poikkileikkauksen pintaneliömomentti
$K_{FI}$	Kuormakerroin
$L_{cr}$	Nurjahduspituus
$N_{b,Rd}$	Teräsprofiilin nurjahduskestävyyden mitoitusarvo
$N_{cr}$	Kriittinen nurjahduskuorma
$N_{t,Rd}$	Teräsprofiilin vetokestävyyden mitoitusarvo
$P$	Esijännitysvoimat (esim. betonissa)
$P_f$	Vaurioitumistodennäköisyys
$Q$	Muuttuvat kuormat
$Q_{k,1}$	Määräävä muuttuva kuorma
$Q_{k,i}$	Muut samanaikaisesti vaikuttavat muuttuvat kuormat
$T$	Ominaisvärähdysaika

## Latinalaiset pienet kirjaimet

$a$	Kiihtyvyys
$f_y$	Materiaalin myötöraja
$g$	Rakenteen oma paino vuoden 1996 rakentamismääräyskokoelmassa
$q_{k1}$	Ensimmäinen määräävä muuttuva kuorma vuoden 1996 rakentamismääräyskokoelmassa

$q_{k2}$	Toinen määräävä muuttuva kuorma vuoden 1996 rakentamismääräyskokoelmassa
$q_{ki}$	Muut muuttuvat kuormat vuoden 1996 rakentamismääräyskokoelmassa
$s$	Katon lumikuorma
$s$	Matka
$s_k$	Maassa olevan lumikuorman ominaisarvo [ $\text{kN/m}^2$ ]
$t$	Aika
$t_1$	Dynaamisen kuormituksen kesto eli kuormituspulssi

#### Kreikkalaiset kirjaimet

$\alpha$	Katon kaltevuuskulma
$\alpha$	Epätarkkuustekijä liittyen teräsprofiilin nurjahduskestävyyden laskentaan
$\beta$	Luotettavuusindeksi
$\gamma_f$	Kuormien osavarmuusluku, jossa huomioidaan kuormien arvojen mahdollisuus poiketa epäedulliseen suuntaan edustavasta arvosta
$\gamma_F$	Osavarmuusluku kuormille, jossa huomioidaan myös mallin epävarmuudet ja mittojen vaihtelut
$\gamma_{G,j}$	Pysyvien kuormien osavarmuusluku
$\gamma_{G,j,inf}$	Epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{G,j,sup}$	Edullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_m$	Materiaaliominaisuuksien osavarmuusluku
$\gamma_M$	Materiaaliominaisuuksien osavarmuusluku, jossa huomioidaan myös mallin epävarmuudet ja mittavaihtelut
$\gamma_{M0}$	Osavarmuuskerroin teräspoikkileikkauksen kestävyys suhteen
$\gamma_{M1}$	Osavarmuuskerroin teräsprofiilin kestävydessä stabiiliuden suhteen
$\gamma_{M2}$	Osavarmuuskerroin teräsprofiilin vetomurtumisen suhteen
$\gamma_P$	Esijännitysvoimien osavarmuusluku
$\gamma_{Rd}$	Kestävyyden määrittämistä varten käytettävän mallin epävarmuuteen liittyvä osavarmuusluku
$\gamma_{Sd}$	Kuormien tai kuormien vaikutusten määrittämistä varten käytettävän mallin epävarmuuteen liittyvä osavarmuusluku
$\gamma_{Q,1}$	Määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku

$\gamma_{Q,i}$	Muiden samanaikaisesti vaikuttavien muuttuvien kuormien osavarmuusluku
$\lambda$	Muunnettu hoikkuus
$\mu_i$	Lumikuorman muotokerroin
$\xi_j$	Epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin
$\Phi$	Normaalijakauman kertymäfunktio
$\phi$	Kerroin liittyen pienennystekijän $\chi$ laskentaan
$\Phi$	Normaalijakauman kertymäfunktio
$\chi$	Pienennystekijä laskettaessa teräsprofiilin nurjahduskestävyyttä
$\chi$	Muuttuvien kuormien ja kokonaiskuorman suhde
$\psi_0$	Muuttuvan kuorman yhdistelykerroin mm. murtorajatilassa ja palautumattomassa käyttörajatilassa (ominaisyhdistelmä)
$\psi_1$	Muuttuvan kuorman tavallinen yhdistelykerroin
$\psi_2$	Pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin muuttuvalle kuormalle
$\psi_{0,1}$	Määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\psi_{0,i}$	Muiden samanaikaisesti vaikuttavien muuttuvien kuormien yhdistelykerroin



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Hallimaisten rakennusten turvallisuus Suomessa on arveluttava. Jo vuosien ajan sekä puu- että teräsrakenteisten hallien kattoja on romahtanut ympäri Suomea lumikuorman vaikutuksesta. Taloudelliset vahingot ovat olleet mittavat, eikä henkilövahingoiltakaan ole välttytty. Esimerkiksi Laukaassa vuonna 2013 sortunut ratsastusmaneesi aiheutti lapsen kuoleman. Keväällä 2018 Torniossa sortuneessa Duudson Activity Parkissa oli onnettomuuden aikaan 120 lasta. Jotta tilanne saataisiin hallintaan, 1. huhtikuuta 2015 astui voimaan laki laajarunkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden arvioinnista. Laki velvoittaa rakennuksen omistajaa huolehtimaan, että pätevä asiantuntija arvioi keskeisten kantavien rakenteiden turvallisuuden. Siirtymäaikaa tarkistuksen suorittamiseen oli 1. huhtikuuta 2019 asti, jos hankkeesta vastasivat toisistaan riippumattomat tahot. Lain tarkoitus on lisätä käytössä olevien rakennusten turvallisuutta. Ympäristöministeriö on myös kehottanut kiinteistöjen omistajia seuraamaan katon lumikuormaa ja kantavien rakenteiden kuntoa sekä poistamaan lunta katolta. Tilanne ei ole hyväksyttävä, vaan kattojen tulisi olla luotettavia ilman lisätoimenpiteitä, sillä myös kattojen tyhjentämistyössä on suuri riski henkilövahingoille. Osa romahtaneista halleista on juuri valmistuneita, osa on voinut kestää pidempäänkin ennen romahtamista. Lumikuorma ei kuitenkaan ole ainoa selittävä syy onnettomuuksille. Rakenteet mitoitetaan lumikuormille, joka tilastojen mukaan esiintyy kerran 50 vuodessa, ja osassa onnettomuuksista lumikuorma on ollut mitoituskorkeutta pienempi. Kattojen romahtamiseen on siis ollut muitakin syitä kuin lumi, esimerkiksi valmistus- ja suunnitteluvirheet. Tyypillisesti onnettomuuteen johtaa useamman osatekijän summa. Toisaalta vanhat hallit on usein mitoitettu hieman eri periaatteilla kuin eurokoodit nykyisin ohjeistavat.

## 1.2 Tavoite

Runsaslumisina talvina hallimaisten rakennusten kattoja sortuu, eikä näin ei saisi olla. Siksi tämän tutkimuksen tarkoitus on lisätä tietämystä lumikuormista. Kattoja romahtaa nimenomaan raskaimman lumikuormituksen aikaan, välitön romahtamisen syy on siis

lumi. Rakenteet voidaan kuitenkin suunnitella ja toteuttaa kestämaan suuret kuormat, joten todelliset syyt romahtamisille ovatkin suunnittelussa tai toteutuksessa tapahtuneet puutteet. Lumen kinostumisilmiöitä katolle erilaisissa sää- ja maasto-olosuhteissa tulisi selvittää lisää. Myös Onnettomuustutkintakeskus on suositellut tämän aiheen tutkimusta. Tässä tutkimuksessa selvitetään lumen osuutta kattojen romahtamisessa; Ovatko eurokoodeissa käytettävät kuormitustapaukset määrääviä, vai pitäisikö kuormitustapauksia lisätä? Eurokoodin kansallinen liite sallisi Suomessa suunniteltavan ja toteutettavan jopa kevyempiä kattoristikoida kuin tällä hetkellä rakennetaan. Käytännössä tähän ei olla kuitenkaan laajamittaisemmin ryhdytty. Tutkitaan, onko Suomen valitsema eurokoodien mukainen mitoitus tapa riittävän luotettava asetettuun tavoitteeseen nähden. Ilmastomuutoksen seurauksena äkilliset lämpötilanmuutokset oletettavasti lisääntyvät. Äkillisen lämpötilan kohoamisen seurauksena koko katon lumimassa saattaa pudota kerralla pois, ja tämä voi aiheuttaa katolle dynaamisen kuormituksen. Tutkitaan, liittyykö dynaaminen kuormitus kattojen sortumiin. Lisäksi lumiesteitä ei välttämättä laiteta katolle ollenkaan, tai laitetaan vain sille lappeelle, jonka alla on kulkuväyliä. Tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa toisella puolella katto on täysi lumikuorma, ja toinen lape on täysin tyhjä. Tutkimuksessa selvitetään, voiko tällainen kuormitustapaus olla määräävä.

### 1.3 Toteutus

Aihe on melko laaja, koska romahtaneisiin halleihin kuuluu erityyppisiä teräs-, puu- ja yhdistelmärakenteisia halleja. Lisäksi onnettomuuksien syitä on useita. Aiheen rajaamiseksi keskitytään vain lumikuorman tutkimiseen teräsrakenteisissa rakennuksissa. Ilmastomuutos mahdollisesti vaikuttaa lumikuormiin tulevaisuudessa, mutta ilmastomuutos itsessään on varsin laaja aihe. Tämän takia lumikuormien arviointia tulevaisuudessa sekä ilmastomuutoksen vaikutusta lumikuormiin ei selvitetä tässä tutkimuksessa. Kattojen romahtaminen ei ole pelkästään Suomessa tapahtuva ilmiö, vaan suunnitteluvirheistä johtuvia kattojen romahtamisia on tapahtunut myös muualla Euroopassa. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kuitenkin vain Suomessa rakennettujen tai rakennettavien kattojen lumikuormia. Tapaustutkimuksen rajatilamitoitus tehdään vain murtorajatilanteesta. Rakenteen väsymistä tai käyttäytymistä palotilanteessa ei huomioida. Tutkimuksen suorittaminen tapahtuu laajana kirjallisuustutkimuksena. Kuormitustapauksien määräävyyteen liittyen tehdään tapaustutkimus, jossa suunnitellaan

teräsrakenteinen kattoristikko ja lasketaan edellä mainittuja staattisia kuormitustapauksia valitulle hallityypille. Tapauksessa tarkastetaan lähes 100 % käyttöasteelle mitoitettun kattorakenteen luotettavuus EN-standardin ohjeiden mukaisesti suunniteltuna sekä erilaisilla vaihtoehtoisilla kuormitustapauksilla laskettuna.

## **2 RAKENTEIDEN MITOITUS STANDARDIN EN 1990 MUKAAN**

### **2.1 Eurokoodien käyttämisen perusta**

Suomessa rakennesuunnittelun on noudatettava Maankäyttö- ja rakennuslakia. Laissa todetaan rakenteiden lujuudesta ja vakaudesta muun muassa: ”Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan siten, että sen rakenteet ovat lujia ja vakaita, soveltuvat rakennuspaikan olosuhteisiin ja kestävät rakennuksen suunnitellun käyttöiän. Kantavien rakenteiden suunnittelun ja mitoituksen on perustuttava rakenteiden mekaniikan sääntöihin ja yleisesti hyväksytyihin suunnitteluperusteisiin taikka luotettaviin koetuloksiin tai muihin käytettävissä oleviin tietoihin.” Laki ei siis määrää yksityiskohtaisia suunnitteluohjeita. (Maankäyttö- ja rakennuslaki 1999/132).

Euroopan komissio on antanut jäsenvaltioilleen suosituksen ottaa käyttöön eurokoodit välineenä, joiden avulla voidaan suunnitella rakenteita sekä tarkastaa vakauteen tai lujuuteen liittyviä kysymyksiä (Komission suositus 2003/887/EY). Lisäksi esimerkiksi teknisten oppilaitosten tulisi edistää eurokoodien opetusta jäsenvaltioissa. Ympäristöministeriö on antanut asetuksen, jonka mukaan ”rakennesuunnittelijan on sovellettava tätä asetusta rakenteiden suunnitteluperusteiden valintaan yhdessä standardin SFS-EN 1990 viimeisimmän voimassa olevan version kanssa.” (Ympäristöministeriön asetus 3/16). Nykyisten asetusten mukaan kantavia rakenteita koskevat tekniset vaatimukset siis täyttyvät, kun suunnittelussa käytetään eurokoodeja sekä niihin liittyviä kansallisia liitteitä. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry on vahvistanut kaikki EN-standardit SFS-standardeiksi. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. on julkaissut suunnitteluohjeita, jotka opastavat suunnittelijoita eurokoodien käytössä.

### **2.2 Rakenteiden suunnitteluperusteet**

Rakenteet on suunniteltava siten, että ne säilyttävät käyttöikänsä ajan käytettävyytensä sekä kaikki todennäköisesti esiintyvät kuormat. Lisäksi onnettomuustapauksissa rakenteen tulee kestää vaurioita siten, etteivät ne ole suhteettoman laajat.

Tulipalotilanteessa rakenteen tulee säilyttää kestäväytensä riittävän ajan. Rakenteilta vaadittava luotettavuus saavutetaan käyttämällä suunnittelussa standardeja EN 1990...1999. Eurokoodien perusvaatimukset saavutetaan, kun valitaan soveltuvat materiaalit, suunnittelutyö tehdään asianmukaisesti eurokoodien mukaan sekä valvontamenettely on riittävä.

Suomessa käytetään erilaisia luotettavuustasoja soveltamalla **seuraamusluokkia**. Seuraamusluokka kuvaa niitä taloudellisia, ympäristöön liittyviä, sosiaalisia tai ihmishenkiin liittyviä seuraamuksia, mitä rakennuksen mahdollinen sortuminen voisi aiheuttaa (ks. Taulukko 1). Jos rakennus koostuu erillisistä rakenneosista, määritetään kunkin rakenneosan seuraamusluokka erikseen.

Taulukko 1. Seuraamusluokat (mukaillen SFS-EN 1990).

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevia esimerkkejä
CC3	<b>Suuret</b> seuraamukset hengenmenetysten tai <b>hyvin suurten</b> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Pääkatsomot; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat suuret
CC2	<b>Keskisuuret</b> seuraamukset hengenmenetysten tai <b>merkittävien</b> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Asuin- ja liikerakennukset; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat keskisuuret
CC1	<b>Vähäiset</b> seuraamukset hengenmenetysten tai <b>pienten tai merkityksettömien</b> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Maa- ja metsätalousrakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä (esim. varastorakennukset, kasvihuoneet)

Valitun seuraamusluokan perusteella rakenteelle määritetään **luotettavuusluokka**, joka vaikuttaa suoraan suunnittelussa käytetyn kuormakertoimen suuruuteen. Seuraamusluokkiin voidaan liittää kolme luotettavuusluokkaa (RC1, RC2, RC3) siten, että RC1 vastaa seuraamusluokkaa CC1. Luotettavuusluokan mukaan valitaan kuormakerroin  $K_{FI}$ , ks. Taulukko 2. Kuitenkin erityisesti RC3 -luokan osalta on usein

parempi käyttää muita keinoja  $K_{FI}$  -kertoimen käytön sijaan (SFS-EN 1990). Eurokoodin mukaan kerrointa  $K_{FI}$  käytetään vain epäedullisten kuormien tapauksessa.

Taulukko 2. Kuormakerroin  $K_{FI}$  luotettavuusluokan mukaan (mukaillen SFS-EN 1990).

Kuormakerroin $K_{FI}$	Luotettavuusluokka		
	RC1	RC2	RC3
$K_{FI}$	0,9	1,0	1,1

Rakenteiden luotettavuusluokkiin liitetään myös suunnittelun valvontataso DSL eli Design Supervisor Level. RC1 -luokkaan kuuluvan suunnittelutehtävän tarkastajaksi riittää suunnittelija itse. Luokassa RC2 suunnitelmat ja laskelmat tarkastavat suunnittelijan lisäksi muut organisaation sisäiset henkilöt kyseisen organisaation menettelytavan mukaisesti. RC3 -luokassa vaaditaan laaja valvonta, eli suunnitelmat tarkastaa kyseisen organisaation lisäksi kolmas osapuoli. Suunnittelun valvontataso saattaa sisältää myös vaatimuksia tarkastuksen suorittavien henkilöiden luokituksesta. Luokitus voi muodostua esimerkiksi heidän pätevyydestään ja kokemuksestaan. Myös toteutuksen aikaiset tarkastukset jaetaan kolmeen luokkaan; itse suoritettu tarkastus, organisaation omien menettelyjen mukainen tarkastus ja kolmannen osapuolen tarkastus.

Rakennusta suunniteltaessa on myös määritettävä sen käyttöikä. Käyttöiät määritellään viiteen eri luokkaan. Asuintalot sekä muut tavanomaiset rakenteet tulee mitoittaa vähintään 50 vuoden käyttöiälle (ks. Taulukko 3). Suunnitellun käyttöiän aikana rakennetta tai sen osaa on voitava käyttää suunniteltuun tarkoitukseensa ennakoitavin kunnossapitotoimenpitein siten että olennaisten korjausten tekeminen käyttöiän aikana ei kuitenkaan ole välttämätöntä. Yleisesti hallien suunniteltu käyttöikä menee luokkaan 3 tai 4.

Taulukko 3. Viitteellinen suunniteltu käyttöikä (mukaillen SFS-EN 1990).

Suunnittelun käyttöiän luokka	Viitteellinen suunniteltu käyttöikä (vuosia)	Esimerkkejä
1	10	Tilapäisrakenteet <sup>(1)</sup>
2	10...25	Vaihdettavissa olevat rakenteen osat, esim. nosturiratapalkit, laakerit
3	15...30	Maatalous- ja vastaavat rakennukset
4	50	Talonrakennukset ja muut tavanomaiset rakenteet
5	100	Monumenttaaliset rakennukset, sillat ja muut maa- ja vesirakennuskohteet
<sup>(1)</sup> Sellaisia rakenteita tai niiden osia, jotka voidaan purkaa uudelleen käytettäväksi, ei pidetä tilapäisinä.		

## 2.3 Rajatilamitoituksen periaatteet

Eurokoodissa rakenteet mitoitetaan rajatilojen mukaan käyttäen osavarmuuslukumenetelmää. Rajatila tarkoittaa rakenteen ja siihen kohdistuvien kuormien tilaa, jossa rakenne ei enää täytä sille asetettua mitoituskriteeriä. EN-standardissa rajatilat jaetaan murtorajatilaan ja käyttörajatilaan. Murtorajatilassa mitoituskriteerin ylittyminen johtaa rakenteen sortumiseen tai muuhun vaurioitumistapaan. Murtorajatiloiksi luokitellaan rakenteen vaurioituminen, murtuminen, väsyminen tai tasapainon menetys. Murtorajatila vastaakin tavallisesti rakenteen suurinta kestävyyttä. Tarkasteltavia murtorajatiloja ovat:

- Jäykän kappaleen tasapainon menetys.
- Liian suuri siirtymätila.
- Rakenteen muuttuminen mekanismiksi.
- Rakenteen katkeaminen.
- Stabiiliuden menetys.
- Väsyminen tai muu vastaava ajasta riippuva vaurioituminen.

Käyttörajatilassa tarkastellaan rakenteen tai rakenneosan käyttökelpoisuusvaatimuksia. Käytettävyyteen voivat vaikuttaa mm. siirtymät, värähtelyt ja vauriot, jotka vaikuttavat ulkonäköön, mukavuuteen, säilyvyyteen ja teknisten järjestelmien toimivuuteen.

## 2.4 Kuormat suunnittelussa

Kuormat luokitellaan eurokoodissa ajallisen vaihtelun mukaan kolmeen luokkaan. Pysyvät kuormat (G) sisältävät esimerkiksi rakenteen oman painon. Oma paino sisältää kantavia ja ei-kantavia rakenteita. Muuttuvalla kuormalla (Q) tarkoitetaan hyötykuormia, kuten lumikuormia sekä tuulikuormaa. Onnettomuuskuormina (A) pidetään esimerkiksi räjähdyksiä tai ajoneuvojen törmäyksiä. Osassa eurokoodin vaikutusalueen maista lumikuormaa pidetään onnettomuuskuormana. Betonissa vaikuttava esijännitys (P) on luokiteltu pysyväksi kuormaksi.

Yhdisteltäessä muuttuvia kuormia käytetään yhdistelykerrointa  $\psi$ . Eurokoodissa käytetyssä kuormien yhdistämistavassa oletetaan, että kuormajakaumien suurimmat arvot esiintyvät yhtäaikaaisesti vain pienellä todennäköisyydellä. Tämän oletuksen seurauksena osaa kuormista pienennetään yhdistelyssä. Yhdistelytapauksissa mitoituskaavaan sijoitetaan oman painon lisäksi määräävä muuttuva kuorma sekä muut samanaikaisesti vaikuttavat kuormat. Määräävää muuttuvaa kuormaa ei pienennetä, mutta muita muuttuvia kuormia kerrotaan yhdistelykertoimilla. Eurokoodin mukaisessa laskentatavassa on kokeiltava, mikä kuorma asetetaan määrääväksi, jotta saavutetaan epäedullisin vaikutus. Yhdistelykertoimiin kuuluu kolme luokkaa:

- $\psi_0$  = muuttuvan kuorman yhdistelykerroin mm. murtorajatilassa ja palautumattomassa käyttörajatilassa (ominaisyhdistelmä).
- $\psi_1$  = muuttuvan kuorman tavallinen yhdistelykerroin.
- $\psi_2$  = pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin.

Suomessa yhdistelykertoimille käytetään kansallisen liitteen mukaisia kertoimia eri kuormille (ks. Taulukko 4).



Taulukko 4. Suomen kansallisen liitteen mukaiset yhdistelykertoimet  $\psi$  (mukaillen standardin SFS-EN 1990 kansallista liitettä).

Kuorma	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6**
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} \leq \text{ajoneuvon paino} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3**
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma*, kun $sk \leq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
sk $\geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ***	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa)	0,6	0,5	0
* Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huomautus: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voida erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään $\psi$ -arvoja jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. ** Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$ *** Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia			

## 2.5 Kuormitusyhdistelmät murtorajatilassa

Rajatilat, jotka liittyvät ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen luokitellaan murtorajatiloina. Varmuuden osoittaminen eurokoodin osavarmuuslukumenetelmällä sisältää kuusi mahdollisesti tarkasteltavaa murtorajatilaa:

- Rakenteen tai sen osan staattisen tasapainon menetys (EQU).
- Rakenteen sisäinen vaurioituminen tai liian suuri siirtymätila (STR), kun materiaalin lujuus on määräävä.
- Maan pettäminen tai siihen liittyvät liian suuret siirtymät (GEO).
- Väsymismurtuminen (FAT).
- Vedenpaineen aiheuttamasta nosteesta tms. pystysuuntaisista kuormista johtuva rakenteen tai maapohjan stabiliteetin menettäminen (UPL).
- hydraulinen maapohjan nousu, sisäinen eroosio- sekä putkieroosio maassa (HYD).

Suunnittelijan on tarkastettava ne murtorajatilat, jotka voivat tulla kyseeseen rakennuksen elinkaaren aikana. Tämä tutkimus liittyy STR -kuormitusyhdistelmään, eikä muita mahdollisesti tarkasteltavia murtorajatiloja sen takia esitetä tarkemmin. EN-standardin mukaan rakenneosien kestävyys (STR) tarkastamiseen käytetään lauseketta (SFS-EN 1990):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

tai vaihtoehtoisesti STR- ja GEO-rajatiloissa epäedullisempaa kahdesta seuraavasta lausekkeesta:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

missä	$\gamma_{G,j}$	on pysyvien kuormien osavarmuusluku,
	$G_{k,j}$	on pysyvät kuormat,
	$\gamma_P$	on esijännitysvoimien osavarmuusluku,
	$P$	on esijännitysvoimat (esim. betonissa),
	$\gamma_{Q,1}$	on määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku,
	$\psi_{0,1}$	on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin,
	$Q_{k,1}$	on määräävä muuttuva kuorma,
	$\gamma_{Q,i}$	on muiden samanaikaisesti vaikuttavien muuttuvien kuormien osavarmuusluku,
	$\psi_{0,i}$	on muiden samanaikaisesti vaikuttavien muuttuvien kuormien yhdistelykerroin,
	$Q_{k,i}$	on muut samanaikaisesti vaikuttavat muuttuvat kuormat ja
	$\xi_j$	on epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin.

Liitteessä A suositellaan käytettäväksi lukujen  $\gamma$  ja kertoimen  $\xi$  arvoina:

$\gamma_{G,j,\text{sup}} = 1,35$  (epäedullinen kuorma).

$\gamma_{G,j,\text{inf}} = 1,00$  (edullinen kuorma).

$\gamma_{Q,1} = 1,50$  epäedullisessa tapauksessa (edullisessa tapauksessa 0).

$\gamma_{Q,i} = 1,50$  epäedullisessa tapauksessa (edullisessa tapauksessa 0).

$\xi = 0,85$  (näin saadaan  $\xi \cdot \gamma_{G,j,\text{sup}} = 0,85 \cdot 1,35 \approx 1,15$ ).

Eurokoodissa lausekkeet tunnetaan lausekkeina (6.10), (6.10a) ja (6.10b). Tekstissä annetaan vaihtoehdoksi käyttää lauseketta (1) tai epäedullisempaa lausekkeista (2) ja (3). Standardi kuitenkin huomauttaa, että ”Liitteessä A esitetään tätä valintaa koskevia lisätietoja”. Liitteessä A (velvoittava liite) todetaan, että valinta kaavojen (6.10), (6.10a) ja (6.10b) välillä esitetään kansallisessa liitteessä. Huomautuksessa todetaan myös, että ”Jos kansallisessa liitteessä valitaan 6.10a ja 6.10b, niin siinä voidaan kaavasta 6.10a poiketa lisäksi siten, että siihen sisältyvät vain pysyvät kuormat” (SFS-EN 1990). Eurokoodi antaa siis kuormien yhdistämiseen kolme vaihtoehtoa:

- lausekkeen (6.10) käyttö,
- epäedullisempi lausekkeista (6.10a) ja (6.10b) tai
- epäedullisempi lausekkeista (6.10a) ja (6.10b) siten, että (6.10a) sisältää vain pysyvät kuormat.

Suomen kansallisessa liitteessä todetaan: ”Rakennesuunnittelijan on sovellettava tätä asetusta rakenteiden suunnitteluperusteiden valintaan yhdessä standardin SFS-EN 1990 viimeisimmän voimassa olevan version kanssa.” Myöhemmin todetaan rakenteiden kestävyys liittyvistä mitoitusyhtälöistä: ”Standardin liitteen A1 kohdassa A1.3.1(4) mainittu rakenteiden kestävyys on, kun geoteknisiä kuormia ei vaikuta, osoitettava määrittämällä kuormien mitoitusarvo yhtälöistä 6.10a ja 6.10b.” (Ympäristöministeriö 2016). Ympäristöministeriön asetus antaa siis ymmärtää, että kuormien yhdistelyssä tulisi käyttää epäedullisempaa lausekkeista (6.10a) ja (6.10b). Kuitenkin standardin SFS-EN 1990 kansallisessa liitteessä olevassa ohjeessa lausekkeita (6.10a) ja (6.10b) käytetään siten, että lauseke (6.10a) sisältää vain pysyviä kuormia.

Yleisesti kansallista liitettä on tulkittu siten, että lauseke (6.10a) sisältää vain pysyvät kuormat, ks. Lauseke (2). Tulkinnan mukaan Suomessa on siis käytettävä rakenneosien kestävyys liittyen epäedullisempaa seuraavista lausekkeista (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2016):

$$1,15K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI}\sum_{i>1}\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4)$$

$$1,35K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} \quad (5)$$

missä	$K_{FI}$	on kuormakerroin (ks. Taulukko 2),
	$G_{kj,sup}$	on epäedulliset pysyvät kuormat,
	$G_{kj,inf}$	on edulliset pysyvät kuormat,
	$Q_{k,1}$	on määräävä muuttuva kuorma,
	$Q_{k,i}$	on muut samanaikaisesti vaikuttavat muuttuvat kuormat ja
	$\psi_{0,i}$	on muuttuvien kuormien yhdistelykerroin (ks. Taulukko 4).

Kaavassa esitetyt ”+” merkinnät tarkoittavat sitä, että kuormat vaikuttavat samanaikaisesti, ja niiden suunta ja merkki on huomioitava erikseen. Kuormia ei voi aina summata suoraan yhteen, vaan suunnittelijan on tarvittaessa muunnettava yksiköt vastaamaan toisiaan. Mahdollisten eri yksiköiden takia yhtälön selitysosassa ei ole mainittu yksiköitä. Pysyviin kuormiin kuuluva rakenteen oma paino lasketaan materiaalien nimellisten tilavuuspainojen mukaan, joita esitetään EN 1991-1-1 liitteessä A. Muuttuvia kuormia yhdisteltäessä ei tarvitse käsitellä sellaisia kuormituksia, joiden ei ole fyysikaalisesti mahdollista esiintyä samanaikaisesti. Esimerkiksi tuulikuorma ei voi kohdistua rakenteeseen yhtä aikaa eri suunnista. Yleensä lauseke (4) on mitoittava (eurokoodissa lauseke 6.10b). Molemmat tapaukset on tarkistettava, ja rakenne mitoitetaan epäedullisemman tuloksen antavan kaavan mukaan.

## 2.6 Lumikuorman laskeminen standardin EN 1990 mukaan

Katon lumikuorma  $s$  saadaan laskettua eurokoodin mukaisesti seuraavasta lausekkeesta:

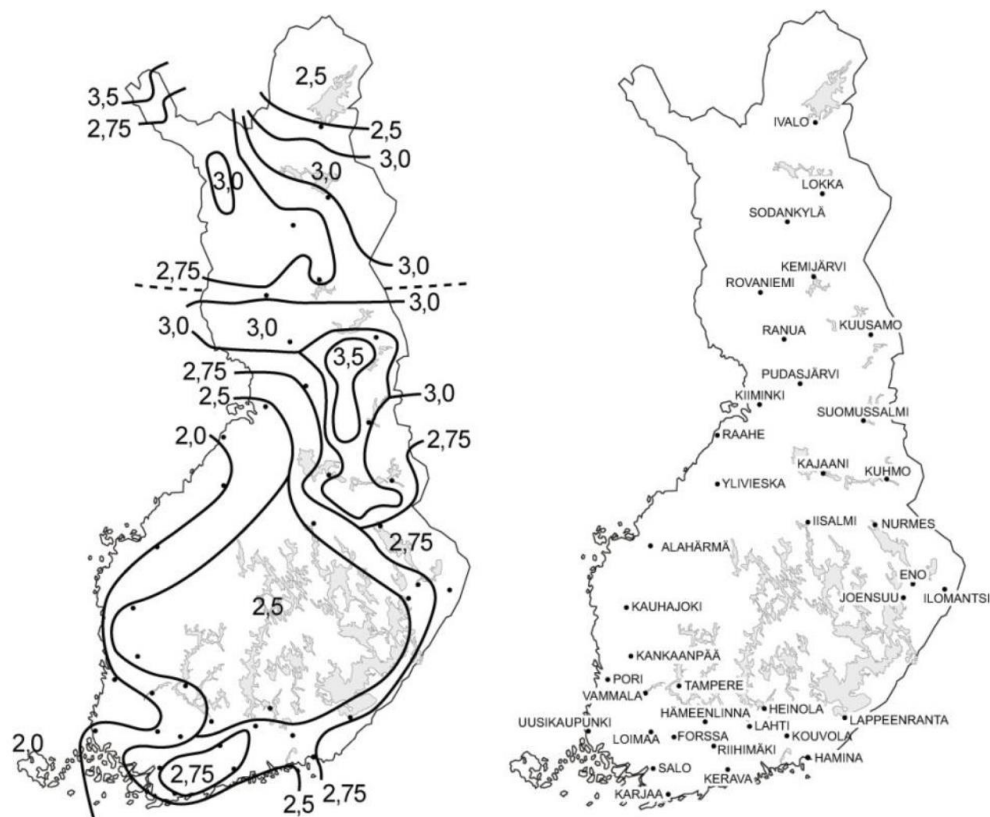
$$s = \mu_i C_e C_t S_k \quad (6)$$

missä	$\mu_i$	on lumikuorman muotokerroin,
	$C_e$	on tuulensuojaisuuskerroin (0,8 tai 1,0),

$C_t$  on lämpökerroin (tavallisesti 1,0) ja

$s_k$  on maassa olevan lumikuorman ominaisarvo [ $\text{kN/m}^2$ ].

Lumikuorman luokittelu on muuttuva kiinteä kuorma, joka vaikuttaa vertikaalisuunnassa suoraan alaspäin. Rakennukset mitoitetaan maanpinnan lumikuorman ominaisarvolle, jonka vuotuinen ylittymistodennäköisyys on 0,02. Mitoittava lumikuorma siis esiintyy tai ylittyy keskimäärin kerran 50 vuoden aikana. Tässä voidaan nähdä korrelaatio rakennusten yleisimpään vähimmäiskäyttöikään, joka on myös 50 vuotta. Lumikuorman suuruuteen vaikuttaa luonnollisesti rakennuskohteen sijainti. Erilaisten sääolosuhteiden takia lunta kertyy talven aikana katoille vaihtelevia määriä eri puolilla Suomea. Tämä on huomioitu eurokoodin kansallisessa liitteessä siten, että kyseessä oleva rakennuskohde tulee suunnitella vain kohdealueen lumikuormille (ks. Kuva 1). Tämä on taloudellisesti järkevää, sillä suurin keskimääräinen lumikuorma on 1,75 -kertainen verrattuna pienimpään keskimääräiseen lumikuorman arvoon.



Kuva 1. Kartta suomen ominaislumikuormista  $s_k$  [ $\text{kN/m}^2$ ] maassa (mukaiillen kansallista liitettä standardiin SFS-EN 1991-1-3).

Kuvan mukaiset ominaislumikuormat ovat kuitenkin minimiarvoja. Tuoreen, painuneen, vanhan ja märän lumen tilavuuspaino voi vaihdella välillä  $1,0 \dots 4,0 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ . Standardissa kehoitetaan suurentamaan lumikuormien arvoja alueilla, joilla ”vettä voi sataa lumen päälle, joka sitten sulaa ja jäätyy - erityisesti tapauksissa, joissa lumi ja jää voivat tukkia katon vedenpoistojärjestelmän”. (SFS-EN 1991-1-3).

Ympäröivä maasto ja viereiset rakennukset vaikuttavat rakennuspaikan tuulisuuteen. Tuulinen maasto on ”laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän kattoa” (RIL 201-1-2011). Tavallisesti tuulensuojaisuuskertoimen arvo on 1,0, mutta tuulisella paikalla voidaan käyttää arvoa 0,8 (ks. Lauseke 6). Eurokoodissa siis oletetaan tuulen vähentävän katolle kohdistuvaa lumikuormaa, joten tuulella on lumikuorman yhteydessä edullinen vaikutus rakenteiden kestävyysasteeseen. Sen sijaan suojaisessa maastossa lunta pääsee kertymään katolle normaalia enemmän. Tällöin varmuutta lisätään tuulensuojaisuuskertoimen arvolla 1,2. Eurokoodin mukaiset tuulensuojaisuuskertoimet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Tuulensuojaisuuskertoimen  $C_e$  arvot (mukaillen SFS-EN 1991-1-3).

Maastotyyppi	$C_e$
Tuulinen <sup>1</sup>	0,8
Normaali <sup>2</sup>	1,0
Suojainen <sup>3</sup>	1,2
<sup>1</sup> <i>Tuulinen maasto</i> : laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän. <sup>2</sup> <i>Normaali maasto</i> : alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta. <sup>3</sup> <i>Suojainen maasto</i> : alue, jolla tarkasteltava rakennuskohde on huomattavasti alempana kuin ympäröivä maasto tai se on korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden ympäröimä.	

Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa otetaan huomioon mahdollinen lumen kinostuminen katolle. Kinostumiseen vaikuttaa esimerkiksi katon muoto, lämpöominaisuudet, pinnan karheus, ympäröivä maasto ja viereiset rakennukset sekä paikallinen ilmasto. Yleisimmillä kattotyypeillä lumikuorman muotokertoimeen  $\mu_i$

vaikuttaa katon kaltevuuskulma  $\alpha$  (ks. Taulukko 6). Kaltevuuskulma on katon ja horisontaalitason välinen kulma.

Taulukko 6. Lumikuorman muotokertoimet (mukaillen SFS-EN 1991-1-3).

Katon kaltevuuskulma $\alpha$	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1(\alpha)$	$\mu_1(0^\circ) \geq 0,8$	$\mu_1(0^\circ) \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0
$\mu_2(\alpha)$	0,8	$0,8 \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0
$\mu_3(\alpha)$	$0,8 + 0,8 \alpha/30^\circ$	1,6	-

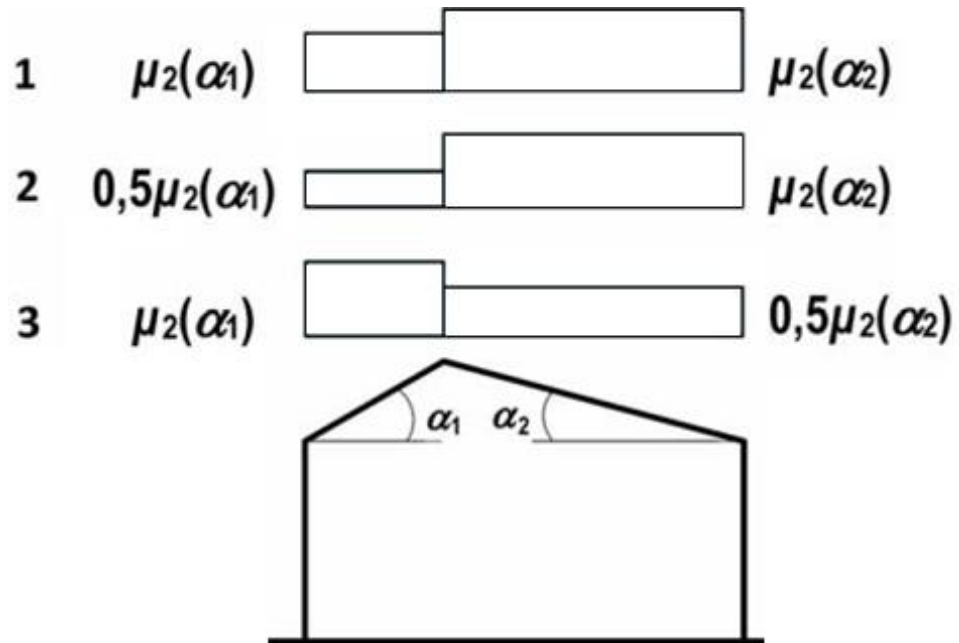
Taulukon arvot ovat voimassa, jos lunta ei estetä liukumasta katolta. Muussa tapauksessa muotokertoimelle kehoitetaan käyttämään vähintään arvoa 0,8. Muotokertoimiin kehoitetaan kiinnittämään erityistä huomiota silloin, kun katto on muodoltaan sellainen, että se voi kerätä merkittäviä lumikuormia verrattuna suoran katon lumikuormaan.

Eurokoodissa esitetään kuormituskaaviota seuraaville kattotyypeille:

- Pulttikatot.
- Harjakatot.
- Sahakatot.
- Kaarikatot.
- Korkeampaa rakennuskohdetta vasten olevat katot.

Suomessa rakennetuista halleista löytyy lähes kaikkia edellä mainittuja kattotyyppejä sekä niiden variaatioita. Tähän tutkimukseen liittyvä tapaustutkimus tehdään harjakattoiselle hallille, joten esitellään vain harjakattojen kuormituskaaviot (ks. Kuva 2). Eurokoodissa on tällä hetkellä kolme eri kuormitustapausta harjakattoiselle rakennukselle. Ensimmäisessä kuormitustapauksessa molemmilla lappeilla oletetaan vaikuttavan maksimikuorma. Lappeiden maksimikuormat ovat eriävät, jos niiden kaltevuuskulmat eivät ole samat. Toisessa kuormitustapauksessa oletetaan, että toisella lappeella vaikuttaa puolet maksimikuormasta samaan aikaan kun toisella lappeella on

täysi lumikuorma. Kolmas kuormitustapaus on sama mutta maksimikuorman ja 0,5 - kertaisten kuorman paikkoja vaihdetaan (ks. Kuva 2).



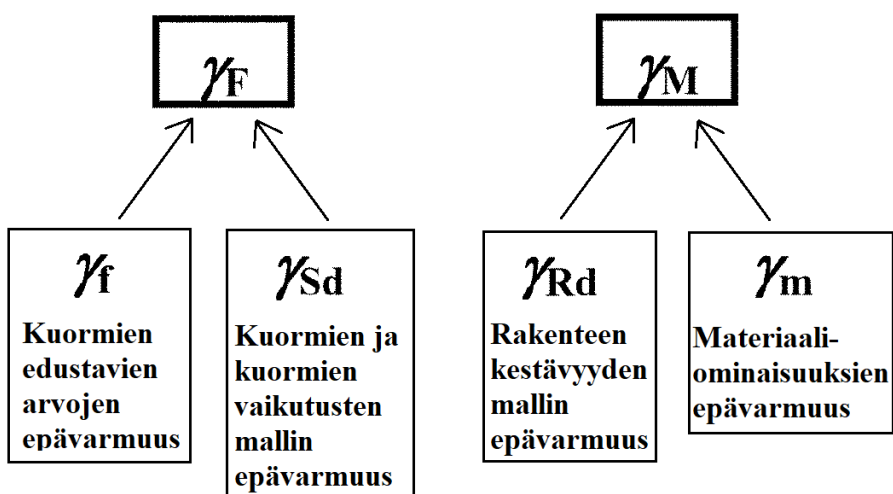
Kuva 2. Harjakaton kuormituskaavio (mukaillen SFS-EN 1991-1-3).



### 3 RAKENTEIDEN VARMUUS

#### 3.1 Varmuusluvut suunnittelussa

Nykyisessä eurokoodin mukaisessa mitoittavassa käytetään osavarmuuslukumenetelmää. Kokonaisvarmuusmenettelyssä kuormia ja rakenteen lujuusparametrejä käsitellään tyypillisesti niiden ominaisarvoilla. Kyseisessä menetelmässä varmuus saadaan mitoittamalla rakenne ennalta asetettuun varmuuskertoimen tavoitearvoon, joka on aina selvästi suurempi kuin yksi. Sen sijaan osavarmuuslukumenetelmässä rakenteeseen kohdistuvia todellisia kuormia suurennetaan osavarmuusluvulla  $\gamma_F$  ja materiaalin todellista kestävyyttä heikennetään osavarmuusluvulla  $\gamma_M$ . Osavarmuuslukumenetelmässä lopulliseksi varmuuskertoimeksi riittääkin siis yksi. Osavarmuusluvut  $\gamma_F$  ja  $\gamma_M$  sisältävät myös käytettyihin malleihin sisältyvän epävarmuuden (ks. Kuva 3). Osavarmuuslukumenettelystä huomautetaan, ettei siinä oteta erikseen huomioon inhimillisiä virheitä (SFS-EN 1990).



Kuva 3. Osavarmuuslukujen väliset suhteet (mukaillen SFS-EN 1990).

Kuormien osavarmuusluvussa  $\gamma_f$  otetaan huomioon kuormien arvojen mahdollinen poikkeaminen epäedulliseen suuntaan edustavasta arvosta. Laskentamallien epävarmuus otetaan huomioon kuvan 3 mukaisesti osavarmuusluvuilla  $\gamma_{Sd}$  ja  $\gamma_{Rd}$ . Materiaalien epävarmuus huomioidaan kertoimella  $\gamma_m$ . Lopulliset osavarmuusluvut  $\gamma_F$  ja  $\gamma_M$  siis sisältävät myös käytetyn mallin mittavaihtelut ja epävarmuudet. On myös huomattava, että eri laskentatapauksille voi olla omat osavarmuuslukunsa. Esimerkiksi teräksen

poikkileikkauksen kestävyuden laskennassa käytetään osavarmuuslukua  $\gamma_{M0} = 1,0$ , mutta vetomurtumista tarkasteltaessa käytetään osavarmuuslukua  $\gamma_{M2} = 1,25$ . Myös pysyvän kuorman osavarmuusluku  $\gamma_G$  sisältää mallin epävarmuudet ja mittojen vaihtelut. Pysyvä kuorma  $G$  voi kuitenkin olla joko edullista ( $G_{k,j,inf}$ ) tai epäedullista ( $G_{k,j,sup}$ ). Edulliseksi kuorma lasketaan silloin, jos se esimerkiksi parantaa rakenteen staattista tasapainoa. Edullisen kuorman tapauksessa kuorman edullista vaikutusta pienennetään kertoimella 0,9. Tämä kasvattaa osaltaan kokonaisvarmuutta.

### 3.2 Rakenteiden luotettavuus

Luotettavuus ilmaistaan tavallisesti todennäköisyyksien avulla. Luotettavuus terminä sisältää rakenteen varmuuden, säilyvyyden ja käyttökelpoisuuden. Standardissa SFS-EN 1990 käytetään luotettavuuden mittana *luotettavuusindeksiä*  $\beta$ . Eurokoodi esittää luotettavuusindeksin vähimmäisarvot eri luotettavuusluokille yhden ja 50 vuoden tarkasteluajanjaksoille (ks. Taulukko 7). Tavoiteltuun luotettavuusindeksiin pyritään määrittämällä osavarmuusluvut pitkäaikaiseen kokemukseen perustuen sekä kokeellisten tietojen ja kenttähavaintojen tilastollisen käsittelyn avulla.

Taulukko 7. Luotettavuusindeksin  $\beta$  tavoitearvot (mukaihen SFS-EN 1990).

Luotettavuusluokka	Indeksin $\beta$ vähimmäisarvot	
	1 vuoden tarkastelujakso	50 vuoden tarkastelujakso
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Luotettavuusindeksin arvo on aikariippuvainen, koska vaurioitumistodennäköisyys kasvaa ajan kuluessa. Luotettavuusindeksi on yksi esitystapa vaurioitumistodennäköisyydelle  $P_f$ . Vaurioitumistodennäköisyyden ja

luotettavuusindeksin välillä on yhteys (SFS-EN 1990, Liite C):

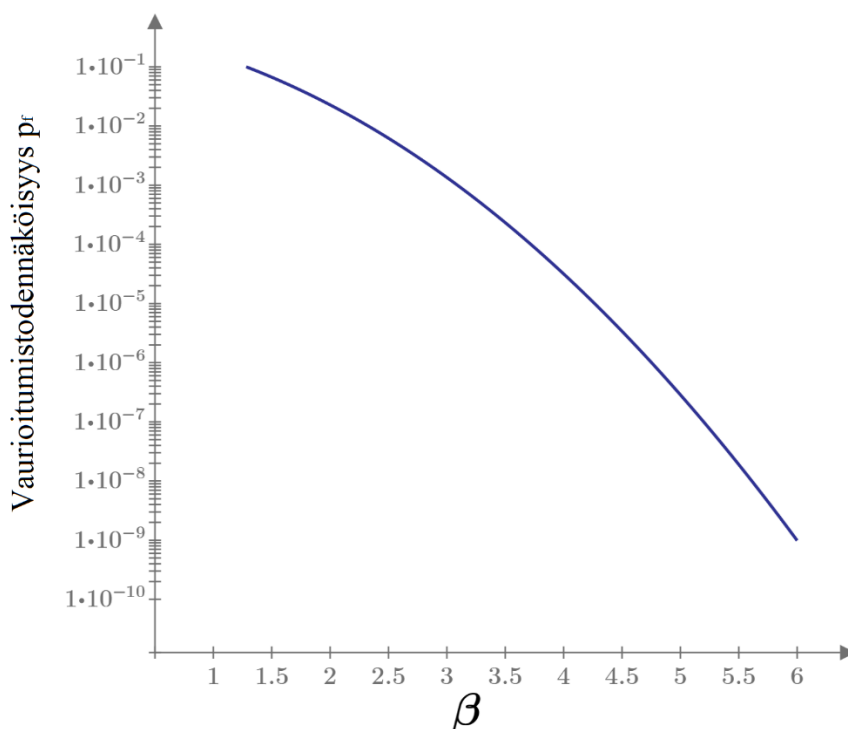
$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

missä  $P_f$  on vaurioitumistodennäköisyys,  
 $\Phi$  on normaalijakauman kertymäfunktio ja  
 $\beta$  on luotettavuusindeksi.

Eurokoodi ilmoittaa rakenteen omalle painolle käytettävän tavallisesti normaalijakaumaa vaurioitumistodennäköisyyden laskemisen yhteydessä. Rakenteen kestävyys ja materiaalin parametreille sekä mallin epävarmuuksille on sen sijaan tavallisesti käytetty lognormaalista tai Weibullin jakaumaa. Myös muuttuville kuormille on käytetty normaalijakaumaa väsymistarkasteluja lukuun ottamatta, vaikka ääriarvojakauma olisikin eurokoodin mukaan tarkoitukseen soveliaampi. Normaalijakauman kertymäfunktio määritellään seuraavasti (Laininen 1998):

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad (8)$$

Normaalijakauman tiheysfunktion integraalia ei voi lausua suljetussa muodossa. Todennäköisyydet täytyykin laskea numeerisella integroinnilla. Kuvassa 4 esitetään vaurioitumistodennäköisyyden ja luotettavuusindeksin välinen yhteys graafisesti. Pystyakselilla käytetään logaritmista asteikkoa.



Kuva 4. Luotettavuusindeksin  $\beta$  ja vaurioitumistodennäköisyyden  $p_f$  välinen suhde.

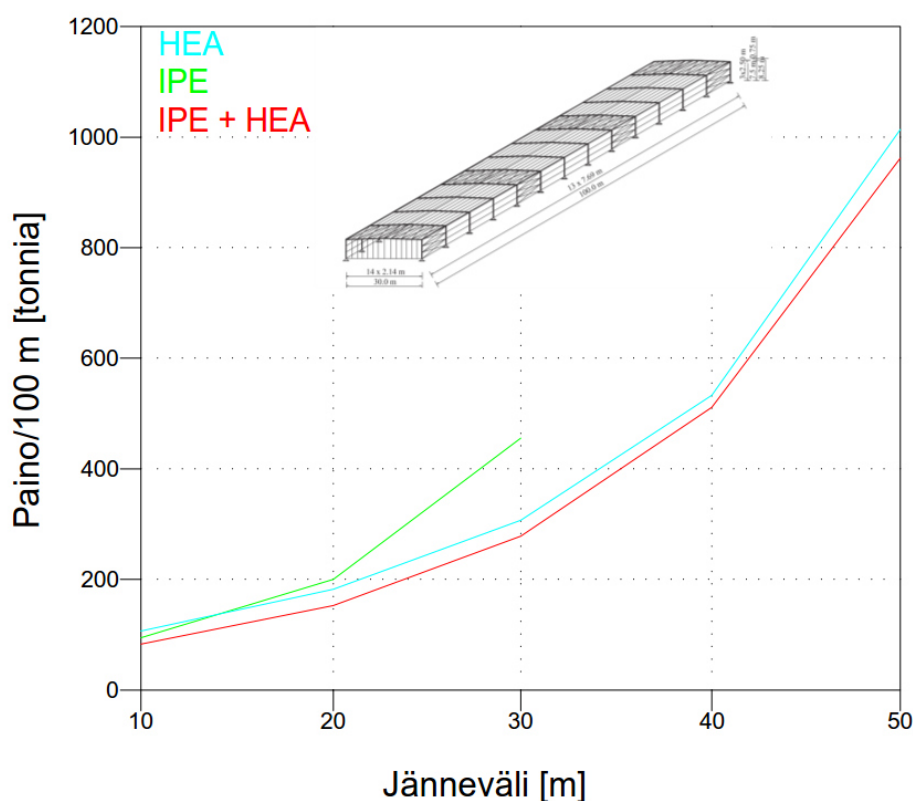
Jos lasketaan lausekkeilla (7) ja (8) vaurioitumistodennäköisyys esimerkiksi 50 vuoden tarkasteluajanjaksolle luokassa RC2, saadaan  $P_f = 7,235 \cdot 10^{-5}$ . Tämä tarkoittaa sitä, että 7,235 rakennusta sadasta tuhannesta todennäköisesti ylittää 100 % käyttöasteen. On kuitenkin huomattava, että rakenne ei välttämättä vaurioidu näissäkään tapauksissa. Vaurioitumistaajuus tarkoittaa sitä, kuinka monessa tapauksessa 100 % käyttöaste todennäköisesti ylittyy. Tällöin siirrytään epävarmalle puolelle, mutta rakenne voi silti vielä kestää. Tämän ”vaurioitumistodennäköisyys” -termin antaman mielikuvan takia usein käytetäänkin mieluummin luotettavuusindeksiä. Toisaalta todellinen vaurioitumistaajuus voi olla suurempikin, koska osavarmuuslukumenetelmä ei esimerkiksi ota huomioon inhimillisiä virheitä.

### 3.3 Kuormien suhteen vaikutus luotettavuuteen

Rakenteen luotettavuus ei ole vakio, vaan riippuu muun muassa muuttuvien kuormien suhteesta kokonaiskuormaan. Pysyvän kuorman ja muuttuvien kuormien erilaisilla variaatioilla voidaan saavuttaa tavoitetta suurempi tai pienempi luotettavuusindeksi. Koska kuormien suhde vaikuttaa luotettavuusindeksin suuruuteen, seuraamuksena siihen

vaikuttavat myös kansallisella liitteellä valittu kuormien yhdistelytapa (6.10, 6.10a ja b, modifioitu), valitut kertoimet (kuten epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin  $\xi$ ) sekä laskentaan valittu jakauma (Gumbel, Weibull, normaalijakauma).

Rakenteen oma paino yksikköä kohti muuttuu valittujen dimensioitten mukaan. Jännevälin kasvaessa lineaarisesti rakenteen paino metriä kohti kasvaa verrannollisesti toiseen potenssiin (ks. Kuva 5). Kuvassa vertaillaan runkojärjestelmän painoja, jossa sininen käyrä kuvaa kokonaan HEA-profiilista valmistettuja kehiä ja vihreä käyrä tarkoittaa kokonaan IPE-profiilista valmistettuja kehiä. Punainen käyrä kuvaa keharakennetta, jossa pilariprofiiliksi on valittu HEA- ja kattokannattajiksi IPE-profiili.



Kuva 5. Jännevälin ja painon suhde eri profiileilla (Hytönen 2016).

Jos rakenne tehdään vahvasta profiilista, päädytään suurempiin jänneväleihin ja kehäväleihin, mutta kokonaismassa on suurempi kuin pienemmillä kehäväleillä ja kevyemmillä profiileilla. Näiden seikkojen lisäksi myös materiaalin myötölujuutta kasvattamalla voidaan saavuttaa keveämpiä rakenteita. Kokonaiskuorman ja muuttuvien kuormien suhde voi siis vaihdella, vaikka käyttöaste olisi sama.

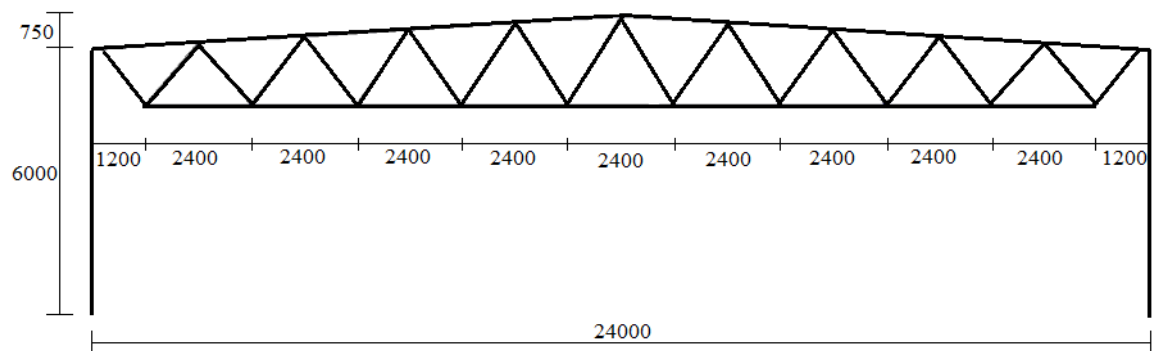
Muuttuvien kuormien ja kokonaiskuorman suhde ilmaistaan yhtälöllä:

$$\chi = \frac{Q_k + W_k}{G_k + Q_k + W_k} \quad (9)$$

missä  $\chi$  on muuttuvien kuormien ja kokonaiskuorman suhde,  
 $Q_k$  on määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo,  
 $W_k$  on muiden samanaikaisesti vaikuttavien muuttuvien kuormien ominaisarvot ja  
 $G_k$  on pysyvän kuorman ominaisarvo.

### 3.4 Mitoitusesimerkki

Muuttuvien kuormien ja kokonaiskuorman suhteen käyttäytymisen arvioinniksi mitoitettiin neljä harjaristikkoa Eurocode 3 -oppikirjan mukaisesti (Kaitila 2010). Suomessa ominaislumikuorma maassa vaihtelee pienimmästä suurimpaan välillä 2,0...3,5 [kN/m<sup>2</sup>]. Kaikkien ristikoiden muuttuvaksi kuormaksi määritettiin lumikuorma ja pysyviksi kuormiksi rakenteen oma paino 1 kN/m sekä vesikate ym. rakenteet 0,4 kN/m<sup>2</sup> (SFS-EN 1991-1-1). Ääripäiden korostamiseksi tuulensuojaisuuskertoimen arvona käytettiin pienellä lumikuormalla (2,0 kN/m<sup>2</sup>) arvoa  $C_t = 0,8$ . Toisessa ääripäässä suurin ominaislumikuorma maassa on 3,5 kN/m<sup>2</sup> tuulensuojaisuuskertoimen ollessa  $C_t = 1,2$ . Tuulensuojaisuuskertoimen arvo vaikuttaa siten, että lumi kinostuu katolle rakennuspaikan ollessa suojainen, koska tuuli ei pääse puhaltamaan lunta pois. Tällöin suunnittelussa valitaan tuulensuojaisuuskerroin 1,2. Tällainen mitoitustilanne voi olla todellinen esimerkiksi Ahvenanmaalla. Sen sijaan tavallista tuulisemmalla paikalla tuuli puhaltaa lunta pois katolta normaalia enemmän, ja kertoimena käytetään arvoa 0,8. Tällainen suunnittelutehtävä voi tulla vastaan esimerkiksi Taivalkoskella. Kuormitustapauksena käytettiin molemmilla lappeilla olevaa täyttä lumikuormaa. Kehäväliksi valittiin 6 m. Ristikoiden dimensioiden valittiin Eurocode 3 -oppikirjan laskentaesimerkin mukaisiksi (ks. Kuva 6).



Kuva 6. Laskentaesimerkin ristikon dimensiot (mukaillen Kaitila 2010).

Mitoituskuormiksi saatiin taulukon 8 mukaiset arvot:

Taulukko 8. Esimerkkiristikoiden kuormitukset.

	Ominaislumikuorma maassa $s_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Lumikuormasta aiheutuva jakautunut kuormitus $q_k$ [kN/m]	Mitoittava jakautunut kuorma (sisältää rakenteen pysyvät kuormat) $q_{Ed}$ [kN/m]
Ristikko 1	2,0 ( $C_t = 0,8$ )	8,598	16,807
Ristikko 2	2,5 ( $C_t = 1$ )	13,434	24,061
Ristikko 3	3,0 ( $C_t = 1$ )	16,116	28,084
Ristikko 4	3,5 ( $C_t = 1,2$ )	22,566	37,759

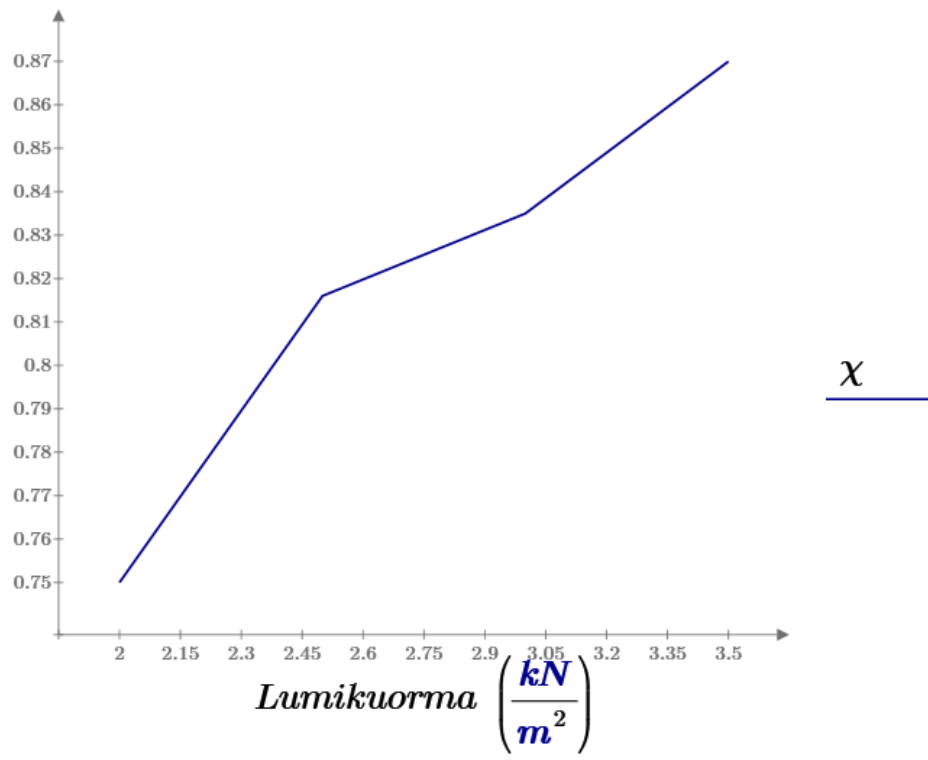
Rakenteesta muodostettiin FEM -ristikkomalli, jolla ratkaistiin ristikon sauvavoimat. Yläpaarteen tuki- ja kenttämomentit ratkaistiin lujuusopillisesti päistään jäykästi tuetun

palkin viivakuormitustapauksella. Ristikoiden yläpaarteet mitoitettiin nurjahdukselle, taivutukselle sekä yhdistetylle taivutukselle ja puristukselle. Alapaarteet mitoitettiin vedolle. Diagonaalisauvat mitoitettiin nurjahdukselle ja vedolle. Diagonaalit valittiin leveydeltään 0,7-0,8 -kertaisiksi suhteessa paarteiden leveyteen, jotta eurokoodin liitosmitoitusehdot täyttyvät. Tämän takia diagonaalisauvat jouduttiin hieman ylimitoittamaan suhteessa nurjahdus- ja vetokestävyyteen.

Kaikissa ristikoissa käytettiin neliöpoikkileikkauksellista rakenneputkea, materiaali S355. Profiili valittiin kokeilemalla RAKENNEPUTKET EN 1993 -käsikirjan tuoteluettelosta (Ongelin & Valkonen 2012). Rakenteiden käyttöasteet vaihtelivat välillä 0,964-0,999. Mitoittavaksi tilanteeksi osoittautui yhdistetty taivutus- ja puristuskestävyys yläpaarteessa. Mitoitetut ristikot tarkistettiin vielä niiden todellisilla omilla painoilla. Todelliset painot olivat hieman pienempiä kuin laskennassa käytetty 1 kN/m, mutta ristikoita ei saatu kuitenkaan optimoitua enää keveämmiksi. Laskelmat 3,5 kN/m<sup>2</sup> alueelle mitoitetusta ristikosta on esitetty liitteessä 1.

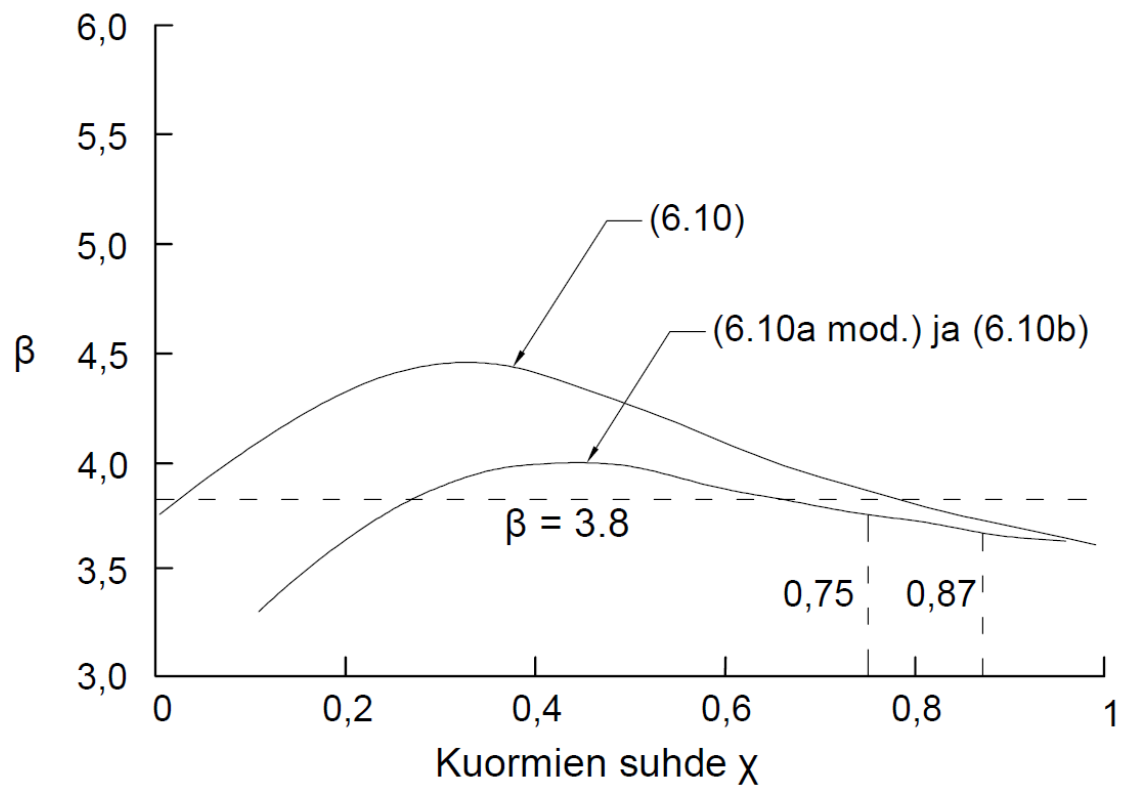
Näistä neljästä eri tavoin kuormitetusta ristikosta muodostettiin lausekkeen (9) mukaiset kuormasuhteet (ks. Kuva 7). Kuvaajasta nähdään, että kaikki mitoitettut esimerkkiristikot asettuvat kuormasuhteeltaan välille 0,75-0,87. Kuormasuhteella 0,87 saavutettava luotettavuusindeksi Suomen kuormitusyhdistelmiä käyttämällä on noin  $\beta = 3,65$ . Tätä vastaava vaurioitumistaajuus  $P_f = 1,311 \cdot 10^{-4}$ . Siis Suomessa käytettävällä mitoitusmenetelmällä esimerkiksi Taivalkoskelle suunnitelluista halleista runsaat 13 hallia sadasta tuhannesta todennäköisesti ylittää suunnitellun käyttöasteen. Kuten aiemmin todettiin, eurokoodi ”sallisi” suunnitellun käyttöasteen ylittävän vain runsaat 7 hallia sadasta tuhannesta.





Kuva 7. Lumikuorman kasvamisen vaikutus kuormien suhteeseen  $\chi$ .

Gulvanessian ja Holicky (2004) esittävät artikkelissaan ”Eurocodes: using reliability analysis to combine action effects” kuvaajan, jossa analysoidaan kuormien suhteen vaikutusta luotettavuusindeksiin eri kuormitusyhdistelyillä (ks. Kuva 8). Analyysi on suoritettu 50 vuoden tarkastelujaksolla ja se soveltuu eri rakennusmateriaaleille. Esimerkkiristikoiden kuormasuhteet asettuvat käyrän loppupäähän, jossa luotettavuusindeksi  $\beta$  on pienempi kuin tavoitearvo 3,8. Tämän tulkinnan mukaan Suomessa käytettävällä laskentamenetelmällä (6.10a ja 6.10b modifioitu) mitoitetut rakenteet eivät yllä tavoiteltuun luotettavuusindeksin arvoon. Vaurioitumistaajuus on tavoiteltua suurempi, eli tilastollisesti suurempi osa rakennuksista ylittää 100% käyttöasteen kuin alun perin on tavoiteltu. Suomessa käytettävällä mitoitusmenetelmällä ei siis välttämättä saavuteta eurokoodin asettamaa tavoitevarmuutta kaikissa tapauksissa.



Kuva 8. Kuormien suhteen vaikutus luotettavuusindeksiin  $\beta$  (mukaillen Gulvanessian & Holicky 2004).

Jotta käyrällä päästäisiin siirtymään lähemmäksi luotettavuusindeksin tavoitearvoa, pitäisi rakenteen oman painon kasvaa suhteessa muuttuvaan kuormaan. Tätä tavoitetta kohti päästäisiin esimerkiksi siirtymällä nykyisten kuormitusyhdistelmien (6.10a mod. ja 6.10b) käytöstä lausekkeen (6.10) käyttöön (ks. Lauseke 1). Tätä suositellaan myös artikkelissa ”Combination of permanent and variable loads” (Poutanen ym. 2018). Kuten kuvasta 8 käy ilmi, lauseke (6.10) johtaa kaikilla kuormasuhteen  $\chi$  arvoilla korkeampaan luotettavuustasoon kuin lausekkeet (6.10a mod.) ja (6.10b). Lausekkeessa (6.10) pysyviä kuormia kerrotaisiin luvulla 1,35 nykyisen  $1,35 \cdot 0,85 \approx 1,15$  sijaan. Varmuuskertoimen valinta vaikuttaa suoraan käyrien sijaintiin vertikaalisuunnassa kuvassa 8. Jos siirryttäisiin lausekkeen (6.10) käyttöön, todelliset kuormat olisivat samat, mutta suurempien varmuuskertoimien takia rakenteet jouduttaisiin mitoittamaan joissakin tapauksissa vahvemmiksi. Tällöin rakenteen oma paino kasvaisi ja kuormien suhde  $\chi$  pienenesi, jonka seurauksena luotettavuusindeksi kasvaisi. Myös laskenta yksinkertaistuisi, kun kahden kaavan sijasta riittäisikin vain yhden kuormitusyhdistelmän laskeminen.

Aikaisemminhan Suomen rakentamismääräyskokoelmassa on käytetty varmempia kertoimia kuin nykyisin käytettävät eurokoodin kertoimet. Esimerkiksi B7 Teräsrakenteet (1996) ohjeissa murtorajatilán primäärirakenteen laskentakuormitus lasketaan seuraavasti (Suomen rakentamismääräyskokoelma 1996):

$$F_d = 1,2 \cdot g + 1,6 \cdot (q_{k1} + q_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,5 \cdot q_{ki}) \quad (10)$$

missä  $F_d$  on mitoituskuorma,  
 $g$  on rakenteen oma paino,  
 $q_{k1}$  on ensimmäinen määräävä muuttuva kuorma,  
 $q_{k2}$  on toinen määräävä muuttuva kuorma ja  
 $q_{ki}$  on muut muuttuvat kuormat.

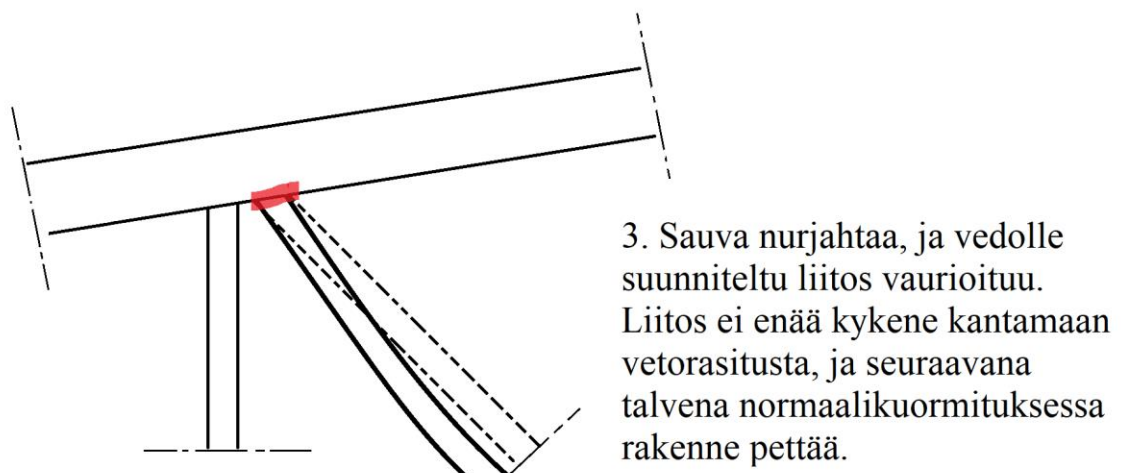
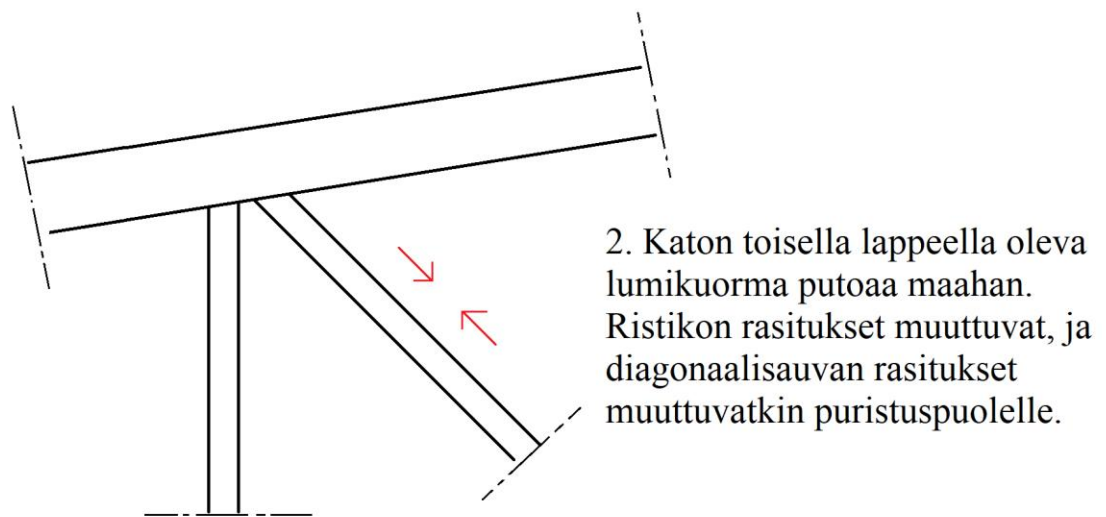
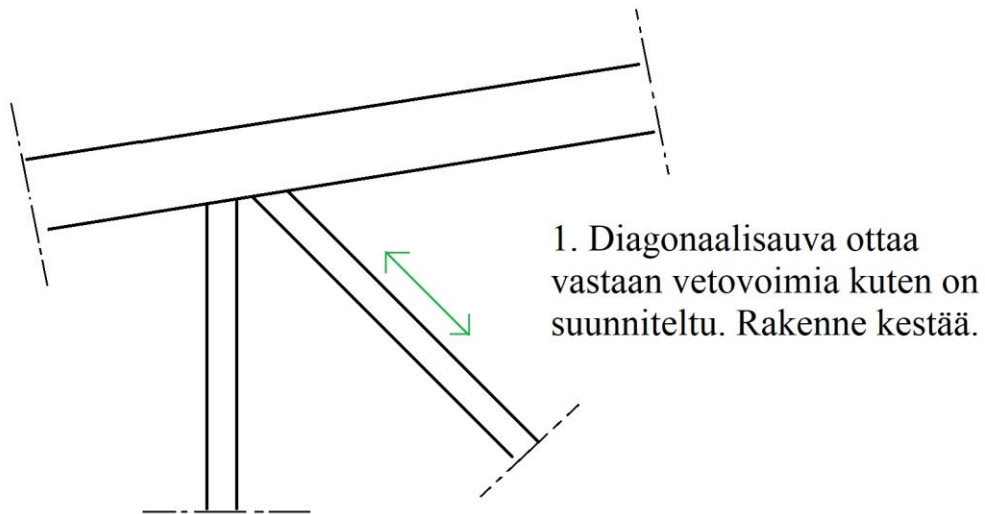
Omaa painoa on siis kerrottu arvolla 1,2 nykyisen 1,15 sijaan ja kahta muuttuvaa kuormaa arvolla 1,6 nykyisen 1,5 sijaan (ks. Lauseke 10).

Kertoimen vaikutusta tutkittiin mitoittamalla kappaleen 3.4 mukaiset ristikot eurokoodin kuormitusyhdistelmällä (6.10), jossa pysyviä kuormia kerrottiin arvolla 1,35. Muutos kuormituksessa on kohtalaisen pieni, ja vain kaikkein raskaimman lumikuorman alueelle ( $3,5 \text{ kN/m}^2$ ) suunnitellussa ristikossa jouduttiin hieman kasvattamaan paarteiden seinämävahvuutta. Kuormasuhteessa muutos näkyi siten, että nykyisellä mitoitusmenetelmällä kyseisen ristikon kuormasuhte  $\chi = 0,87$ , mutta lausekkeella (6.10) mitoitettuna kuormasuhte pieneni arvoon  $\chi = 0,866$ .

## 4 KUORMITUSTAPAUKSET

Kuten aiemmin kävi ilmi, eurokoodi esittää harjakattoiselle rakennukselle kolme pääkuormitustapausta. Ensimmäisessä tapauksessa katto mitoitetaan täydelle lumikuormalle molemmilla lappeilla. Toisessa kuormitustapauksessa toinen lape on kuormitettu täydellä lumikuormalla ja toisella lappeella on puolet täydestä lumikuormasta. Kolmannessa kuormitustapauksessa vaihdetaan täysi ja puolikas lumikuorma vastakkaisille lappeille.

Tutkimuksen yksi tavoite on tutkia, pitäisikö eurokoodissa tutkia nykyisten kuormitustapausten lisäksi myös muita kuormitustapauksia katon mitoittamisen yhteydessä. Kuorman vähentämisen vaikutuksesta ristikon sisäisiin rasituksiin ollaan kiinnostuneita erityisesti siinä mielessä, vaihtuuko sauvojen kuormitussuunta vedolta puristukselle tai toisinpäin. Vetosauvat on mitoitettu ainoastaan vedolle, ja niiden liitokset tai profiilin poikkileikkaus eivät välttämättä kestä paljoakaan puristusta. Yksi katon romahtamiseen johtaneista syistä voi olla tilanne, jossa vetosauva on joutunut puristukselle. Sauva on nurjahtanut, ja liitokset ovat vaurioituneet. Raskaan lumikuorman alla liitokset pettävät ja kaikkien muiden osatekijöiden summana katto romahtaa (ks. Kuva 9).



Kuva 9. Yksi ristikon vaurioitumismalli.

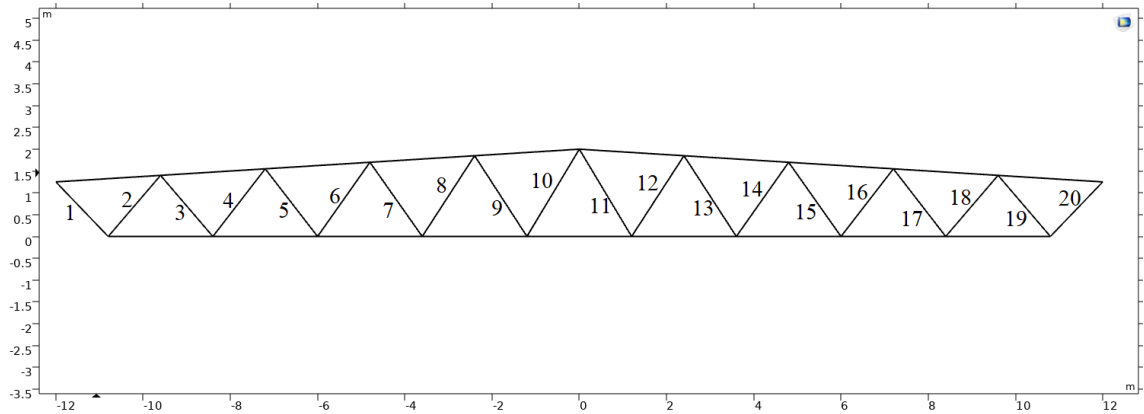
Kuvan 9 mukainen tilanne voi syntyä erityisesti silloin, jos diagonaalisauvat mitoitetaan taloudellisesti käyttämällä eri profiileita ristikon eri kohdissa. Tällaisessa tapauksessa lähes kaikki diagonaalisauvat voivat olla mitoitetu lähelle 100 % käyttöastetta.

#### 4.1 Staattiset kuormitustapaukset

Mahdollisten uusien kuormitustapauksien selvittämiseksi tutkitaan jo aiemmin kappaleessa 3.4 *Mitoitusesimerkki* käytettyä ristikkogeometriaa käyttämällä kolmea eri kuormitustapausta ja verrataan niitä keskenään. Ensiksi selvitetään ristikon rasitukset ”normaalissa” kuormituksessa eli tilanteessa, jossa molemmilla lappeilla on täysi lumikuorma (Tapaus A). Seuraavaksi lasketaan myös eurokoodin mukainen tapaus, jossa toisella lappeella on vain puolet täydestä lumikuormasta ja toisella lappeella on edelleen täysi lumikuorma (Tapaus B). Käytetään symmetristä ristikköä, jolloin muuten saman mutta toispuoleisen tilanteen tarkistaminen ei ole tarpeen. Kolmanneksi lasketaan tapaus, jossa toisella lappeella on täysi lumikuorma ja toinen lape on tyhjä (Tapaus C).

Oleellista eri kuormitustapauksien kohdalla on vertailla ristikon sisäisiä voimasuureita. Tutkitaan, muuttuuko sauvojen tai paarteiden kuormitus vedolta puristukselle tai toisinpäin. Toisaalta tarkkaillaan myös sitä, voivatko joissain rakenteissa esiintyvät kuormat pysyä samansuuntaisina mutta kasvaa suuremmiksi katon kuormituksen muuttuessa.

Lasketaan ristikon sisäiset voimasuureet käyttämällä FEM-ohjelmaa Comsol Multiphysics 5.3. Valitaan vertailuristikoksi kappaleen 3.4 *Mitoitusesimerkki* mukainen ristikkogeometria. Ristikko sijoitetaan  $3,5 \text{ kN/m}^2$  ominaislumikuorman alueelle, jolloin viivakuormaksi ristikolle saadaan kuormitusyhdistelyn jälkeen  $37,759 \text{ kN/m}$ . Asetetaan FEM-laskennassa ristikon reunaehdoiksi toiseen päähän niveltuki ja toiseen päähän estetty siirtymä pystysuunnassa. Tulosten yksilöimiseksi numeroidaan sauvat kuvan 10 mukaisesti. Laskennasta saadut tulokset esitetään kappaleissa 4.1.1, 4.1.2 ja 4.1.3.



Kuva 10. Vertailuristikko, jossa numeroidut sauvat.

#### 4.1.1 Täysi lumikuorma molemmilla lapeilla

Tapaus A

Kuormitus: -37,759 kN/m molemmilla lapeilla.

Laskentatulokset: ks. Taulukko 9.

Taulukko 9. Aksiaaliset voimat tapauksessa, jossa katolla on täysi lumikuorma molemmilla lapeilla.

Sauvat	1	2	3	4	5
Aksiaaliset voimat [kN]	534,34	-507,69	342,55	-328,92	189,03
	6	7	8	9	10
	-182,95	61,049	-59,449	-49,194	48,131
	11	12	13	14	15
	48,131	-49,194	-59,449	61,049	-182,95
	16	17	18	19	20
	189,03	-328,92	342,55	-507,69	534,34
Yläpaarre [kN]	-1389,4				
Alapaarre [kN]	1413,5				

#### 4.1.2 Täysi ja puolikas lumikuorma

Tapaus B

Kuormitus: -37,759 kN/m vasemmalla lappeella, 18,88 kN/m oikealla lappeella.

Laskentatulokset: ks. Taulukko 10.

Taulukko 10. Aksiaaliset voimat tapauksessa, jossa katolla on täysi lumikuorma vasemmalla lappeella ja puolikas lumikuorma oikealla lappeella.

Sauvat	1	2	3	4	5
Aksiaaliset voimat [kN]	460,13	-437,18	279,21	-268,1	133,82
	6	7	8	9	10
	-129,52	12,133	-11,815	-93,116	91,104
	11	12	13	14	15
	-18,907	19,324	-77,359	79,442	-144,91
	16	17	18	19	20
	149,72	-225,28	234,62	-324,36	341,39
Yläpaarre [kN]	-1114,8				
Alapaarre [kN]	1119				



### 4.1.3 Täysi lumikuorma vasemmalla lappeella

Tapaus C

Kuormitus: -37,759 kN/m vasemmalla lappeella.

Laskentatulokset: ks. Taulukko 11.

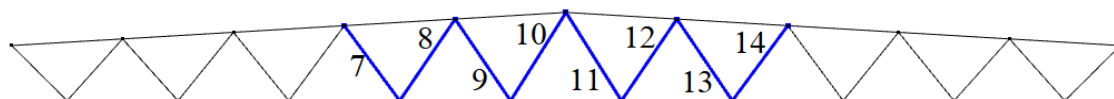
Taulukko 11. Aksiaaliset voimat tapauksessa, jossa katolla on täysi lumikuorma vasemmalla lappeella.

Sauvat	1	2	3	4	5
Aksiaaliset voimat [kN]	385,91	-366,66	215,87	-207,28	78,614
	6	7	8	9	10
	-76,089	-36,786	35,822	-137,04	134,08
	11	12	13	14	15
	-85,948	87,847	-95,27	97,835	-106,87
	16	17	18	19	20
	110,41	-121,64	126,68	-141,02	148,43
Yläpaarre [kN]	-845,69				
Alapaarre [kN]	865,26				

### 4.1.4 Tulosten tarkastelu

Taulukoista 9-11 käy ilmi, että ylä- ja alapaarteiden osalta ei muodostu ongelmaa kuormituksen muuttuessa symmetrisestä epäsymmetriseksi. Paarteiden aksiaaliset voimat pienenevät siirryttäessä täydestä lumikuormituksesta puolikkaaseen lumikuormaan ja edelleen täysin tyhjään oikeanpuoleiseen lappeeseen.

Mielenkiintoisempia tuloksia onkin diagonaalisauvoissa. Osassa sauvoista kuormitus muuttuu eri suuntaiseksi, joka voi johtaa rakenteen vaurioitumiseen. Osa sauvoista käyttäytyy kuten paarteetkin, eli kuormitus pienenee, kun toiselta lappeelta vähennetään lumikuormaa. Sen sijaan ristikon keskellä sijaitsevat sauvat (numerot 7-14) joko muuttavat kuormitussuuntaansa tai kuormitus kasvaa (ks. Kuva 11).



Kuva 11. Ristikon sauvat, jotka muuttavat kuormitussuuntaa tai niiden kuormitus kasvaa.

Taulukko 12. Sauvat 7-14, joiden kuormitus muuttuu rakenteen kestävyiden kannalta epäedulliseen suuntaan kuormitustapausten vaihtuessa.

Tapaus A		7	8	9	10	11	12	13	14
		61,049	-59,449	-49,194	48,131	48,131	-49,194	-59,449	61,049
Tapaus B		7	8	9	10	11	12	13	14
		12,133	-11,815	-93,116	91,104	-18,907	19,324	-77,359	79,442
Tapaus C		7	8	9	10	11	12	13	14
		-36,786	35,822	-137,04	134,08	-85,948	87,847	-95,27	97,835

Taulukossa 12 on esitetty allekkain diagonaalisauvat 7-14 ja niiden aksiaaliset voimat kaikissa kolmessa kuormitustapauksessa. Sauvat 7 ja 11 muuttavat kuormitussuuntaa vedolta puristukselle. Sauvat 8 ja 12 muuttavat kuormitussuuntaa puristukselta vedolle. Sauvoissa 9, 10, 13 ja 14 kuormitus pysyy samansuuntaisena mutta kasvaa.

Sauvoissa 7-14 on siis kaksi mahdollista vaurioitumispolkua. Ensinnäkin niissä sauvoissa, joissa kuormitus kasvaa pysyen samansuuntaisena, voidaan luonnollisesti siirtyä yli 100% käyttöasteelle. Sauva voi joko nurjahtaa tai sen vetokestävyys ei olekaan enää riittävä. Jos esimerkiksi sauva 10 on mitoitettu kestävänsä 100 kN aksiaalista vetoa, se säilyttää vielä varmuutensa kuormitustapauksessa B, kun toisella lappeella onkin vain puolet normaalista lumikuormasta. Lappeen tyhjentyessä kokonaan lumesta sauvaan kohdistuukin entistä enemmän vetorasitusta, ja sauva siirtyy epävarmalle puolelle. Pahimmassa tapauksessa rakenne vaurioituu.

Ne sauvat, jotka muuttavat kuormitussuuntaa, jaotellaan myöskin kahteen tapaukseen. Sauvat 8 ja 12 siirtyvät puristuspuolelta vetopuolelle. Nämä tapaukset eivät välttämättä ole kovin vakavia, sillä sauvojen nurjahduskestävyys osoittautuu yleensä mitoittavaksi eikä niinkään vetokestävyys. Sen sijaan sauvoissa 7 ja 11 tapahtuu kuormituksen suunnan muuttuminen vetopuolelta puristukselle. Tämä aiheuttaa kysymyksen siitä, riittääkö vedolle mitoitettun sauvan kestävyys nurjahduspuolella. Esimerkin vuoksi mitoitetaan sauva 11. Vetokestävyys lasketaan lausekkeella (11):

$$N_{t.Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (11)$$

missä  $N_{t.Rd}$  on vetokestävyyden mitoitusarvo,  
 $A$  on diagonaalisauvan poikkileikkauspinta-ala,  
 $f_y$  on materiaalin myötöraja ja  
 $\gamma_{M0}$  on osavarmuusluku (1,0).

Puristukestävyyden laskemista varten tarvitaan kriittinen nurjahduskuorma, ks. Lauseke (12):

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{L_{cr}^2} \quad (12)$$

missä  $N_{cr}$  on kriittinen nurjahduskuorma,  
 $E$  on materiaalin kimmokerroin,  
 $I_y$  on poikkileikkauksen pintaneliömomentti ja  
 $L_{cr}$  on nurjahduspituus.

Nurjahduskuorman avulla voidaan laskea muunnettu hoikkuus, ks. Lauseke (13):

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (13)$$

Pienennystekijä saadaan lausekkeesta (14):

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \quad \text{kuitenkin aina } \chi \leq 1 \quad (14)$$

missä  $\chi$  on pienennystekijä ja  
 $\Phi$  saadaan lausekkeesta (15):

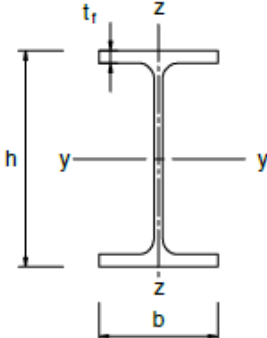
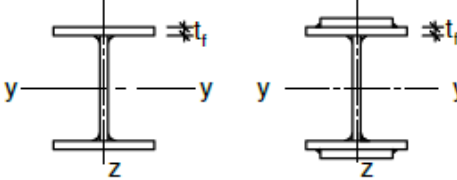

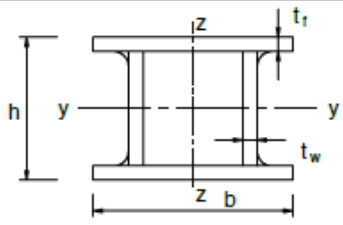
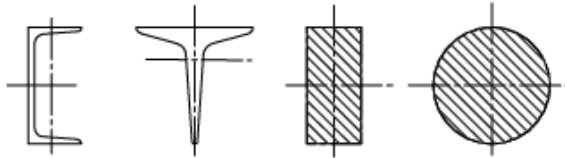
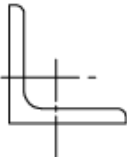
$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] \quad (15)$$

missä  $\alpha$  on epätarkkuustekijä.

Epätarkkuustekijä  $\alpha$  saadaan eurokoodin taulukoista (ks. Kuva 12 ja Kuva 13).

Nurjahduskäyrä	$a_0$	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Kuva 12. Epätarkkuustekijän arvot (SFS-EN 1993-1-1).

Poikkileikkaus		Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Valssat I-profiilit		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a a <sub>0</sub>
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d c
Hitsat I-profiilit		$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y-y z-z	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$		y-y z-z	c d
Rakennepu- ket		Kuumamuovattu		Kaikki	a
		Kylmämuovattu		Kaikki	c
Hitsat koteloprofiilit		Yleensä (poikkeus, ks. alla)		Kaikki	b
		Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		Kaikki	c
U-, T- ja umpiprofiilit		Kaikki		c	c
L-teräkset		Kaikki		b	b

Kuva 13. Nurjahduskäyrän valinta profiilin ja materiaalin mukaan (SFS-EN 1993-1-1).

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo voidaan lopulta laskea lausekkeesta (16):

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (16)$$

missä  $\gamma_{M1}$  on osavarmuuskerroin sauvojen kestävydessä stabiiliuden suhteen (1,00).

Tapauksen A mukaisesti sauvan 11 tulee kestää vetoa 48,131 kN. Valitaan materiaaliksi S355 teräs. Vetokestävyyden täyttämiseksi lausekkeella (11) saadaan vaadittava poikkipinta-ala 1,356 cm<sup>2</sup>. Valitsemalla teräsprofiilien valmistajan taulukosta profiili 30x30x3 (Ongelin & Valkonen 2012), saadaan vetokestävyyden käyttöasteeksi 45 %. Tapauksessa B kuormitus muuttuu arvoon -18.907 kN, ja diagonaalin nurjahduskestävyys tulee mitoittavaksi. Lausekkeella (16) saadaan käyttöasteeksi 96,1 %, eli aiemmin valittu profiili on yhä riittävän kestävä. Tapauksessa C kuormitus muuttuu kuitenkin jo arvoon -85,948 kN. Tällöin nurjahduskestävyys ei ole riittävä, vaan sauvan puristuskapasiteetista käytetään 437 %. Toisen lappeen tyhjentyessä kokonaan lumesta sauvan kuormitukset siis muuttuisivat siten, että se nurjahtaa.

Toisaalta toisen lappeen ollessa tyhjä 100/437 -kertainen kuorma riittää tilanteeseen, jossa sauvan puristuskestävyys ylittää 100 % käyttöasteen. Sauva siis nurjahtaa kuormalla, joka on 22,9 % täydestä lumikuormasta, kun toinen lape on tyhjä. Tällainen kuormitus on hyvin tavallinen.

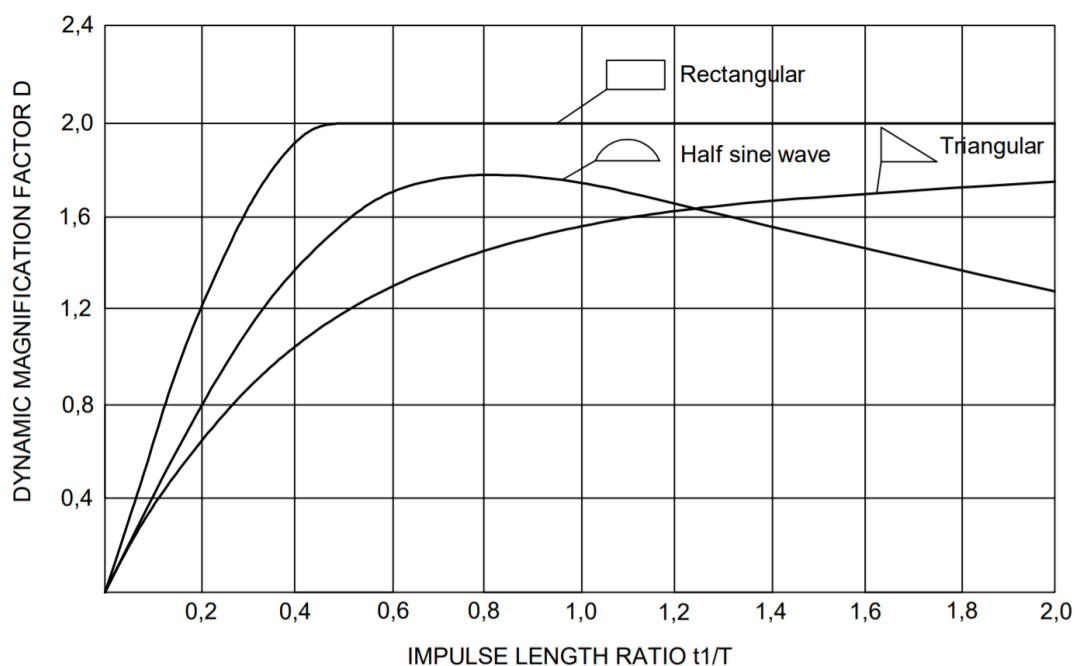
Kuten aiemmin todettiin, diagonaalien suositusleveys on 0,7-0,8 kertaa paarteiden leveys, jotta eurokoodin liitosmitoitusehdot täyttyisivät. Esimerkin profiilista (S355 30x30x3) on huomattava, että se ei täytä tätä ehtoa.

## 4.2 Dynaaminen kuormitus

Eurokoodi määrittelee dynaamisen kuorman kuormaksi, ”joka aiheuttaa rakenteen tai rakenneosien merkittävän kiihtyvyyden” (SFS-EN 1990). Dynaamisen kuorman vaikutusta rakenteiden kestävyYTEEN voidaan arvioida korvaamalla dynaaminen kuorma saman vaikutuksen tuottavalla staattisella kuormalla eli kvasistaattisella kuormalla.

Dynaamiset osuudet voidaan huomioida sisällyttämällä ne staattisiin arvoihin tai kertomalla staattisia kuormia dynaamisilla suurennuskertoimilla. Dynaaminen suurennuskerroin lisätään kuormien yhdistelyssä lumikuormaan. Tarvetta tarkemmalle kuormitusanalyysille ei ole, jos dynaaminen kerroin huomioon ottaen kuormien yhteissumma on pienempi tai yhtä suuri kuin rakenteen mitoituskuorma. Jos rakenneosan kiihtyvyys on merkittävä, rakenne tulee analysoida dynaamisena järjestelmänä.

Dynaamisen kertoimen määrittämistä varten tarvitaan kuormitetun rakenteen ominaisvärähdysaika  $T$  ja dynaamisen kuormituksen eli pulssin kesto  $t_1$ . Eri lähdeteoksissa esitetään käyrästöjä dynaamisen kertoimen arvioimiseksi. Kuvassa 14 esitetään dynaaminen kuormituskerroin  $D$  erilaisilla kuormitustyypeillä riippuen  $t_1/T$  -suhteesta.



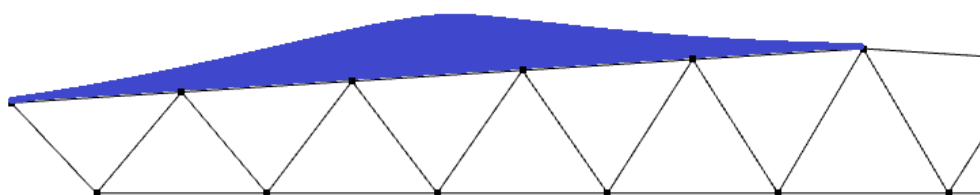
Kuva 14. Dynaaminen kuormituskerroin erityyppisillä kuormitustapauksilla (mukaillen Clough & Penzien 1975).

Jotta saataisiin käsitys dynaamisen kertoimen suuruudesta erilaisilla kuormituspulsseilla, kappaleen 3.4 Mitoitusesimerkki mukaiselle ristikkogeometrialle laskettiin kolme alinta ominaisvärähdysaikaa. Paarteissa käytettiin profiilia 200x200x6 ja diagonaalisauvoissa profiilia 140x140x4. Laskenta tehtiin FEM-ohjelmistoilla Comsol Multiphysics 5.4 ja Abaqus/CAE Student Edition 2018. Ohjelmien tulokset vastasivat toisiaan 0,01 Hz tarkkuudella. Laskennassa kokeiltiin sekä sauva- että palkkimallia, eivätkä tulokset

poikenneet oleellisesti toisistaan. Kolme alinta ominaistaajuutta kyseiselle ristikolle on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Ominaisvärähtelytaajuuudet esimerkkiristikolle.

Muoto	Ominaisvärähtelytaajuus [Hz]
1	9,8977
2	30,636
3	41,876



Kuva 15. Kinostuneen lumen aiheuttama epätasaisesti jakautunut kuorma.

Jotta liukuva lumi voisi aiheuttaa rakenneosille dynaamisen kuormituksen, tulee sen olla kinostunut lappeelle epätasaisesti (ks. Kuva 15). Kasautuneen ja liukuvan lumen aiheuttamaa kuormitusta kuvaa kuvassa 14 annetuista tapauksista parhaiten puolikas siniaalto. Jos kuormituspulssi  $t_1$  on 2,6 s ja ominaisvärähtelytaajuus 9,8977 Hz, saadaan  $t_1/T = 0,263$ . Kuvan 14 ja taulukon 13 perusteella siniaallon muotoisella kuormituksella dynaaminen kerroin  $D$  on yli 1 silloin, kun kuormituspulssin kesto on 2,6 sekuntia tai enemmän.

Mustasaaren kunnassa romahti osa Botnia-urheiluhallin katosta vuonna 2003. Onnettomuustutkintakeskuksen tekemässä raportissa on arvioitu lumen liukumisen vaikutusta rakenteiden vaurioitumiseen. Lumen kiihtyvyyteen vaikuttaa esimerkiksi kattomateriaali, mekaaniset esteet kuten ruuvinkannat sekä lumen olomuoto ja lämpötila katon ja lumen rajapinnalla. Tutkintaselostuksessa lumen kiihtyvyydeksi Botnia-hallin katolla on laskettu VTT:n ”Arktinen kitkatutkimus” -projektissa kehitetyllä mallilla 5



$\text{m/s}^2$  (Onnettomuustutkintakeskus 2003). Jos tässä tutkimuksessa käytetyn esimerkkiristikon lappeella oleva lumi lähtisi liukumaan  $5 \text{ m/s}^2$  kiihtyvyydellä katolta pois, lappeen tyhjenemiseen kuluva aika voitaisiin laskea lausekkeesta (17):

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} \quad (17)$$

missä	s	on matka,
	a	on kiihtyvyys ja
	t	on vakiokiihtyvyydellä a matkaan s kulunut aika.

Kiihtyvyyden ollessa  $a = 5 \text{ m/s}^2$  ja matkan ollessa esimerkkiristikon lappeen pituus  $s = 12 \text{ m}$ , koko katon tyhjenemiseen kuluvaksi ajaksi saadaan  $t = 2,191$  sekuntia. Kuten aiemmin todettiin, dynaaminen kerroin D ylittää arvon 1, jos kuormituspulssin kesto puolikkaan siniaallon muotoisella kuormituksella on 2,6 sekuntia tai enemmän. Näillä parametreilla laskettuna dynaamisen kertoimen sisältävä kvasistaattinen kuorma ei siis kasvaisi staattista kuormaa suuremmaksi. Dynaamista kuormitusta ei näin ollen olisi tarpeen tarkastella tässä tapauksessa. Kuitenkin on syytä huomioda, että laskennassa on tehty paljon oletuksia. Dynaamisen kuorman vaikutusta ja sen tarkastelun tarpeellisuutta olisikin syytä tarkastella omassa tutkimuksessaan.

## 5 YHTEENVETO

Tutkimus koostuu kahdesta osa-alueesta. Ensiksi tutkittiin Suomessa käytettävää eurokoodien mukaista mitoitusastetta ja Suomen kansallisella liitteellä tekemää valintaa kuormitusyhdistelmiin liittyen. Eurokoodi antaa kolme vaihtoehtoa kuormitusyhdistelmien suhteen. Eurokoodi kehottaa käyttämään yhdistelmää (6.10) yksinään tai valitsemaan epäedullisemmän vaikutuksen antava yhtälöistä (6.10a) ja (6.10b). Kuitenkin liitteessä A annetaan myös vaihtoehtoksi käyttää yhtälöitä (6.10a) ja (6.10b) siten, että yhtälöön (6.10a) sisällytetään vain pysyvät kuormat. Suomen ympäristöministeriö on vahvistanut kansallisella liitteellä Suomen valinnaksi yhtälöiden (6.10a) ja (6.10b) käyttö edellä mainitulla tavalla modifioituna.

Rakenteiden luotettavuus ilmaistaan eurokoodissa luotettavuusindeksillä  $\beta$ . Eri luotettavuusluokkiin suunniteltaville rakennuksille on annettu vähimmäisluotettavuusindeksi. Luotettavuusindeksi on yksi ilmaisutapa vaurioitumistodennäköisyydelle. Luotettavuusindeksi siis kertoo, kuinka suurella osalla rakennuksista suunniteltu käyttöaste tulee todennäköisesti ylittymään. Luotettavuusindeksi ei ole vakio, vaan riippuu muuttuvien kuormien suhteesta kokonaiskuormaan. Tyypillisten kuormasuhteiden selvittämiseksi tutkimuksessa mitoitettiin neljä kattoristikkoa eri puolille Suomea. Havaittiin, että Suomen valitsemalla kuormitusyhdistelytavalla ei saavuteta eurokoodin asettamaa tavoiteluotettavuusindeksiä kaikissa tapauksissa. Yksi vaihtoehto päästä lähemmäksi tavoiteluotettavuusindeksiä on valita käyttöön esimerkiksi kuormitusyhdistelmä (6.10). Tämä myös yksinkertaistaisi osaltaan laskentaa, kun suunnittelijan ei tarvitsisi tarkastaa kahta tapausta.

Toisessa osa-alueessa keskityttiin tutkimaan eurokoodin mukaisia kuormitusastetta laskemisen osalta. Eurokoodin mukaisessa laskennassa tarkastetaan tapaus, jossa molemmilla lappeilla vaikuttaa täysi lumikuorma. Sen lisäksi tarkistetaan tilanteet, jossa toisella lappeella on täysi lumikuorma ja toisella lappeella 0,5 kertaa täysi lumikuorma. Tutkimuksessa selvitettiin, voisiko mitoittavaksi yhdistelyksi osoittautua tilanne, jossa toisella lappeella on täysi lumikuorma ja toinen lape on tyhjä. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi silloin, kun katolla on lumiasteet rakennuksen kulkuseinustalla, mutta katveeseen jäävälle lappeelle ei ole nähty tarpeelliseksi asentaa lumiasteita. Myös lumen pudotustyössä voidaan tyhjentää toinen lape ensin kokonaan

tyhjäksi, vaikka ympäristöministeriön ohjeiden mukaan lumi pitäisikin tyhjentää katoilta tasaisesti. Selvityksessä laskettiin aiemmassa kappaleessa mitoitettun esimerkkiristikön aksiaalisia voimia eurokoodin mukaisissa kuormitustapauksissa sekä tutkimustapauksessa ja vertailtiin niitä keskenään. Kävi ilmi, että vähennettäessä lumikuormaa toiselta lappeelta osassa diagonaalisauvoista kuormitus muuttui suuremmaksi tai kuormitussuunta vaihtui. Tutkimuksessa mitoitettiin yksi diagonaalisauvoista kantamaan nykyisin käytettävät lumikuormatapaukset. Kun molemmilla lappeilla oli täysi lumikuorma, sauva oli vedolla ja sen käyttöaste oli 45 %. Toisessa eurokoodin mukaisessa tapauksessa (toinen lape täysi ja toisella puolet maksimikuormasta) sauvan kuormitussuunta muuttui puristukselle ja sen käyttöasteeksi saatiin 96,1 %. Kolmannessa tapauksessa (toinen lape täysi ja toinen tyhjä) sauvan puristusvoima kasvoi vielä 4,5 -kertaiseksi toiseen tapaukseen verrattuna. Sauvan käyttöasteeksi saatiin 437%, eli sauva nurjahti. Nurjahtamisen rajatilanteeseen riittäisikin 23 % täydestä lumikuormasta toisella lappeella, jos toinen lape on tyhjä. Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että olisi aiheellista selvittää, pitäisikö kyseinen kuormitustapaus lisätä nykyisten kuormitustapausten rinnalle. Eurokoodin mukainen tilanne, jossa toisella lappeella on puolet täydestä lumikuormasta, voitaisiin mahdollisesti jättää pois.

## LÄHDELUETTELO

Clough, R. & Penzien, J. 1975. Dynamics of structures. Michigan: McGraw-Hill, 634 s. ISBN 9780070113923.

Euroopan yhteisöjen komissio 2003/887/EY. Komission suositus rakennuskohteita ja kantavia rakennustuotteita koskevien eurokoodien täytäntöönpanosta ja käytöstä. Tiedoksiannettu numerolla K(2003) 4639. [Viitattu 16.5.2019]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1558001087766&uri=CELEX:32003H0887>

Gulvanessian, H. & Holicky, M. 2004. Eurocodes: using reliability analysis to combine action effects. Structures & Buildings 158, s. 243-252.

Hytönen, O. 2016. Hitsatun profiilin ja ristikkorakenteen mitoitus sekä teknis-taloudellinen vertailu teollisuusrakennusten runkorakenteissa. Oulu: Oulun yliopisto, 81 s.

Kaitila, O. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry, 183 s. ISBN 978-952-9683-50-5.

Laininen, P. 1998. Todennäköisyys ja sen tilastollinen soveltaminen. Neljäs painos. Helsinki: Hakapaino Oy, 308 s. ISBN 951-672-279-2.

Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132. Finlex. [Viitattu 16.5.2019]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Ongelin, P. & Valkonen, I. 2012. Rakenneputket EN 1993 -käsikirja. Keuruu: Rautaruukki Oyj, 688 s. ISBN 978-952-5010-51-0

Onnettomuustutkintakeskus. 2003. Monitoimihallin katon vaurioituminen Mustasaaressa 17.1.2003. Liite 2: Orsivistikon ja vaurioituneen liitoksen rakenneanalyysit ja mitoitus. Helsinki: Onnettomuustutkintakeskus, 38 s.

Phoon, K. 2008. Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications. New York: CRC Press, 530 s. ISBN 0-415-39630-1.

Poutanen, T., Pursiainen, S., Mäkinen, J. & Lämsävaara, T. 2018. Combination of permanent and variable loads. Rakenteiden mekaniikka (Journal of Structural Mechanics), 51 (1), s. 1-9.

SFS-EN 1990 + A1 + AC. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 85+ 99 s.

SFS-EN 1991-1-1 + AC. 2002. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 45+ 26 s.

SFS-EN 1991-1-3 + AC + A1. 2015. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 47+ 34 s.

Suomen rakennusinsinöörien liitto. 2011. RIL 201-1-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki : Suomen rakennusinsinöörien liitto 2011, 190 s. ISBN 978-951-758-533-0.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. 1996. Teräsrakenteet. Ohjeet 1996. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto, 51 s.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Ympäristöministeriö, 24 s.

Ympäristöministeriö. 2016. Ympäristöministeriön asetus (3/16) rakenteiden suunnitteluperusteita koskevista kansallisista valinnoista sovellettaessa standardia SFS-EN 1990. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BC352472F-E7C4-4653-BF44-1AB47FB50CB0%7D/137127>

**Ristikon mitoitus alueelle jossa lumikuorma maassa 3,5kN/m<sup>2</sup>**

Kehäväli 6m.

Hallin pituus 48m.

Jänneväli 24m.

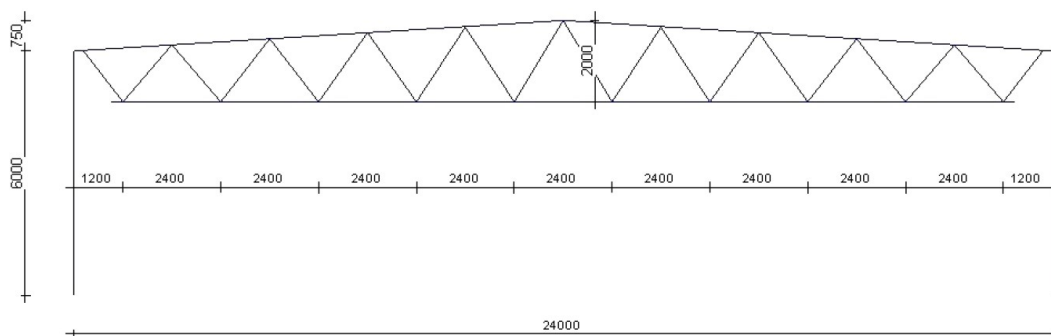
Ristikon kaltevuus 1:16, korkeus 2m.

Paarteen ja uumasauvojen leveyksien suhde 0.7-0.8.

Teräs S355.

Uumasauvojen kulmaksi lähelle 45°

Ei-kantavien rakenteiden paino 0.4kN/m<sup>2</sup>

**Ristikon kuormat:**

Pysyvät kuormat

Ei-kantavien rakenteiden  
paino

$$g_{k1} := 0.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 6 \text{ m} = 2.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ristikon oma paino

$$g_{k2} := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Lumikuorma

Katolla olevan lumikuorman  
ominaisarvo

$$q_k := 3.761 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 6 \text{ m} = 22.566 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kuormitusyhdistelmä  
(ristikolle tuleva  
viivakuorma):

$$q_{Ed} := 1.15 \cdot (g_{k1} + g_{k2}) + 1.5 \cdot q_k = 37.759 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Solmuille tuleva kuorma

$$F_{Ed} := \frac{q_{Ed} \cdot 24 \text{ m}}{11} = 82.383 \text{ kN}$$

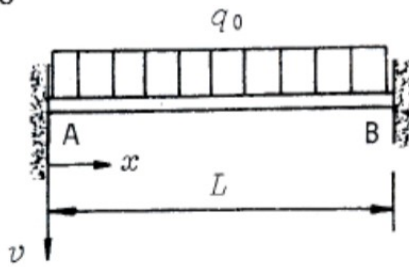
Comsolilla lasketut  
akksiaaliset voimat

Liite 1 (2)

Max veto alapaarteessa	$N_{alap} := 1413.5 \text{ kN}$
Max puristus yläpaarteessa	$N_{yläp} := -1389.4 \text{ kN}$
Max veto diagonaaleissa	$N_{vd} := 534.34 \text{ kN}$
Max puristus diagonaaleissa	$N_{pd} := -507.69 \text{ kN}$

Momentit viivakuormasta

38



$$\begin{aligned}
 A &= B = \frac{1}{2} q_0 L \\
 M_A &= M_B = -\frac{1}{12} q_0 L^2 \\
 M(x) &= \frac{1}{12} q_0 L^2 \left[ -1 + 6 \frac{x}{L} - 6 \left( \frac{x}{L} \right)^2 \right] \\
 M_{\min} &= M(0) = M(L) = -\frac{1}{12} q_0 L^2
 \end{aligned}$$

$$L := 2400 \text{ mm} \quad x := 1200 \text{ mm}$$

Tukimomentti

$$M_t := \frac{1}{12} \cdot q_{Ed} \cdot L^2 = 18.124 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kenttämomentti

$$M_k := \frac{1}{12} \cdot q_{Ed} \cdot L^2 \left( -1 + 6 \cdot \frac{x}{L} - 6 \cdot \left( \frac{x}{L} \right)^2 \right) = 9.062 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### Yläpaarteen mitoitus

Mitoittavat voimasuureet

$$\begin{aligned}
 N_{Ed} &:= N_{yläp} = -1.389 \cdot 10^3 \text{ kN} \\
 M_{Ed} &:= M_t = 18.124 \text{ kN} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

Putkiprofiilin 200x200x6  
poikkileikkausarvot  
rautaruukin  
putkiprofiilikäsikirjasta

$$\begin{aligned}
 A &:= 45.63 \text{ cm}^2 \\
 W_{pl} &:= 264.4 \text{ cm}^3 \\
 f_y &:= 355 \text{ MPa} \\
 E &:= 210 \text{ GPa} \\
 I_y &:= 2037 \cdot 10^4 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Yläpaarteen  
nurjahduskestävyys

$$\begin{aligned}
 L &:= 2400 \text{ mm} \\
 L_{cr} &:= 0.9 \cdot L = 2.16 \text{ m} \\
 \gamma_{M0} &:= 1 \\
 \gamma_{M1} &:= 1 \\
 N_{cr} &:= \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{L_{cr}^2} = (9.049 \cdot 10^3) \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\lambda := \sqrt{A \cdot \frac{f_y}{N_{cr}}} = 0.423$$

Nurjahduskäyrä c ->

$$\alpha := 0.49$$

$$\phi := 0.5 \left( 1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2 \right) = 0.644$$

Nurjahduskestävyyden  
mitoitusarvo

$$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.885$$

$$N_{b.Rd} := \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = (1.434 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\frac{-N_{Ed}}{N_{b.Rd}} = 0.969 \quad \text{OK}$$

Yläpaarteen  
taivutuskestävyys

$$M_{c.Rd} := W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 93.862 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c.Rd}} = 0.193 \quad \text{OK}$$

Yhdistetty taivutus- ja  
puristuskestävyys

$$\alpha_s := \frac{-M_k}{M_t} = -0.5$$

$$c_{my} := 0.1 - 0.8 \cdot \alpha_s = 0.5$$

$$N_{c.Rd} := A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = (1.62 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$k_{yy1} := c_{my} \cdot \left( 1 + (\lambda - 0.2) \cdot \left( \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{c.Rd}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) = 0.392$$

$$k_{yy2} := c_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{c.Rd}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0.112$$

$$k_{yy} := \min(k_{yy1}, k_{yy2}) = 0.112$$

$$\chi_{LT} := 1$$

$$\frac{-N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{c.Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{c.Rd}} = 0.991$$

OK

Valittu yläpaarre kestää.



## Alapaarteen mitoitus

Liite 1 (4)

Veto

$$N_{Ed} := N_{alap} = (1.414 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Kestävyys

$$N_{c.Rd} = (1.62 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c.Rd}} = 0.873 \quad \text{OK}$$

## Diagonaalin mitoitus

Putkiprofiilin 140x140x4  
poikkileikkausarvot

$$A := 21.35 \text{ cm}^2$$

$$W_{pl} := 108.2 \text{ cm}^3$$

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

$$I_y := 651.6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Nurjahduspituus on 0.9 x solmuväli joka on 1.9m

Diagonaalin  
nurjahduskestävyys

$$N_{Ed} := N_{pd} = -507.69 \text{ kN}$$

$$L := 1900 \text{ mm}$$

$$L_{cr} := 0.9 \cdot L = 1.71 \text{ m}$$

$$N_{cr} := \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{L_{cr}^2} = (4.619 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\lambda := \sqrt{A \cdot \frac{f_y}{N_{cr}}} = 0.405$$

$$\alpha := 0.49 \quad (\text{käyrä c})$$

$$\phi := 0.5 \left( 1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2 \right) = 0.632$$

$$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.895$$

Nurjahduskestävyyden  
mitoitusarvo

$$N_{b.Rd} := \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 678.056 \text{ kN}$$

$$\frac{-N_{Ed}}{N_{b.Rd}} = 0.749 \quad \text{OK}$$

Diagonaalin vetokestävyys

$$N_{Ed} := N_{vd} = 534.34 \text{ kN}$$

$$N_{c.Rd} := A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 757.925 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c.Rd}} = 0.705 \quad \text{OK}$$

Diagonaaliksi kävisi pienempikin putki mutta ohjeiden mukaisesti pyritään diagonaalien ja paarteiden leveyksien suhteeseen 0.7-0.8.

## Rakenteen oma paino:

Liite 1 (5)

### Yhteismassa

Comsolin antama ristikon kokonaismassa

$$m_{ristikko} := 2345 \text{ kg}$$

$$G_{ristikko} := 22996 \text{ N}$$

$$q_{ristikko} := \frac{G_{ristikko}}{24 \text{ m}} = 0.958 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ristikon oma paino on niin lähellä laskennassa käytettyä 1kN/m arvoa, ettei mitoitusta tarvitse tarkastaa. Käyttämällä todellista omaa painoa rakennetta ei saataisi optimoitua keveämmäksi.

### Lumikuorman ominaisarvon ja muun kuorman suhde

Lumikuorman ominaisarvo

$$q_k = 22.566 \text{ m} \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$m_{lumi} := \frac{q_k \cdot 24 \text{ m}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = (5.521 \cdot 10^4) \text{ kg}$$

Ei-kantavien rakenteiden paino

$$g_{k1} := 0.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (\text{Eurokoodista 1991-1-1 s. 42})$$

$$q_{k1} := g_{k1} \cdot 6 \text{ m} = 2.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\chi := \frac{q_k}{q_k + q_{ristikko} + q_{k1}} = 0.87$$

$\chi$  on muuttuvat kuormat jaettuna kokonaiskuormalla.